NOTIONS GÉNÉRALES

SUR

L'ÉLECTRICITÉ

ET LE

MAGNÉTISME

NOTES DE COURS

RÉDIGÉES A L'USAGE DES ÉTUDIANTS

PAR

Mgr J.-C. K. LAFLAMME, P. A.

SECONDE ÉDITION.

H. Simard

QUÉBEC:
IMPRIMERIE GÉNÉRALE A. COTÉ ET Cie

1896

BIBLIOTHEQUE
S.M.E.
1964
Séminaire de Québec

AVANT-PROPOS.

Comme celles de la première édition, dont elles ne sont d'ailleurs le plus souvent que l'exacte reproduction, les notes qui composent ce petit volume n'ont été rédigées que pour les élèves de mon cours. Je me suis décidé à les publier, dans l'espérance qu'elles seraient de nature à faciliter l'étude des principes généraux de l'électricité, surtout pour ceux qui se préparent à subir les épreuves du baccalauréat et de l'inscription dans la faculté des arts de notre Université.

C'est pour atteindre plus immédiatement ce but que je n'ai pas voulu suivre, dans l'exposé de mon sujet, un autre ordre que celui du programme tel qu'arrêté par les collèges affiliés, dans leur congrès de 1891, et ratifié ensuite par le conseil universitaire.

A part l'inconvénient de rendre à peu près impossible la division de ce travail en chapitres distincts, ce point de vue spécial, n'embrassant qu'un cadre restreint, m'a encore obligé à ne donner que des aperçus d'ensemble toujours très abrégés, souvent même incomplets.

Au professeur alors de combler ces lacunes, soit en développant davantage certains points qui ne sont qu'indiqués ou sont même complètement sous-entendus, soit surtout en donnant, sur les applications pratiques, tous les détails qui sont capables de faire mieux comprendre la nature et l'importance des principes généraux.

Afin que cet enseignement tout personnel du professeur porte pour les étudiants des fruits plus abondants et plus durables, le verso de chaque page a été laissé en blanc. L'élève pourra ainsi noter dans le livre lui-même, les idées théoriques de son professeur et les applications pratiques qui lui auront été plus spécialement signalées.

C'est encore pour laisser aux professeurs la plus grande liberté possible que ces pages ne contiennent aucune théorie électrique proprement dite. Exception a été faite pour l'hypothèse des lignes de forces de Faraday et Maxwell, bien qu'elle ne soit qu'une hypothèse. Elle occupe dans la science électrique une place assez large pour avoir, jusqu'à un certain point, droit de cité dans tout opuscule qui traite de l'électricité, même s'il se borne à peu près exclusivement à l'étude expérimentale des lois et des phénomènes électriques.

J'ai mis entre parenthèses les développements qui sont en eux-mêmes nécessaires à l'intelligence plus parfaite des faits ou des lois, mais qui cependant ne paraissent pas strictement exigés par les questions telles qu'énoncées dans le programme du baccalauréat.

Pour compléter ces notes, j'y ai mis, en appendice, quelques notions générales sur les courants polyphasés. L'importance que les

applications de ces courants prennent tous les jours, surtout pour le transport de l'énergie électrique, rendait cette addition à peu près nécessaire.

Enfin, j'ai cru que je pourrais, dans une certaine mesure, remédier à l'absence de divisions claires et précises, en ajoutant une table alphabétique des matières. Je l'ai faite aussi complète et aussi détaillée que possible. De cette façon, l'élève trouvera facilement le mot ou le sujet sur lequel il tiendra à se renseigner.

J.-C. K. LAFLAMME.

ELECTROSTATIQUE

I

ÉLECTRICITÉ.

On désigne sous le nom d'électricité une forme spéciale d'énergie, qui nous est inconnue dans sa nature et qui se trahit par des attractions et des répulsions mécaniques, des phénomènes lumineux, calorifiques et magnétiques et par des décompositions chimiques.

ÉLECTRISATION PAR LE FROTTEMENT.

Si l'on frotte une tige de verre avec un morceau de soie, la tige de verre possède la propriété d'attirer à elle les corps légers. On dit qu'elle est électrisée. En opérant avec soin, on trouve que la soie l'est également. D'ailleurs, quels que soient les corps qui frottent les uns sur les autres, cette action mécanique a toujours pour résultat de les électriser simultanément.

ÉLECTROSTATIQUE

De plus en approchant la tige de verre d'un corps léger suspendu par un fil de soie, on voit que le corps, attiré d'abord, est ensuite repoussé par le verre. Si, à ce moment, on en approche le morceau de soie avec lequel on a frotté le verre, il y a attraction. C'est en partant de là qu'on a distingué deux états électriques. Le premier, celui du verre dans l'exemple déjà cité, est appelé *positif*; l'autre, celui de la soie, est appelé *négatif*. On remarque encore que deux charges de même signe, positives ou négatives, se repoussent mutuellement, et qu'une charge négative attire une charge positive et vice versa. C'est ce qui avait fait dire aux anciens que les fluides de même nom se repoussaient et que les fluides de nom contraire s'attiraient. Ces deux charges, positive et négative, sont toujours égales, du moment qu'on les étudie sur deux corps frottant l'un sur l'autre.

(Cette quantité ne dépend pas du frottement plus ou moins énergique; elle paraît provenir plutôt du contact plus ou moins parfait qui s'établit entre les deux corps. C'est ainsi que le cuivre et le zinc, étant simplement mis en contact, sans aucun frottement, se chargent, l'un négativement l'autre positivement. Par conséquent, la seule chose à considérer dans l'énergie électrique est la quantité plus ou moins grande d'électricité et son signe positif ou négatif, sans

rechercher si c'est, comme on disait jadis, de l'électricité de friction ou de l'électricité galvanique.

On remarque qu'il est tout à fait impossible de créer l'électricité ou de la détruire. La seule chose à notre portée est de faire varier sa capacité de travail ou son énergie potentielle. Par exemple, de chaque côté d'un moteur ou d'une lampe électrique, le fil débite la même quantité d'électricité. La seule différence est dans l'énergie plus faible que possède l'électricité après avoir traversé ces appareils. Nous sommes ici en présence d'un fait analogue au principe général de la conservation de l'énergie ou de l'indestructibilité de la matière.

C'est ce qui a conduit quelques théoriciens à regarder l'électricité comme étant un état spécial de l'éther, et à tenter d'expliquer les phénomènes électriques en supposant que les molécules de ce fluide agissaient par répulsion sur elles-mêmes, et par attraction sur les molécules des corps.

Alors, dans un corps à l'état neutre, l'éther serait en équilibre. Il serait accumulé ou agirait par excès dans les corps chargés *positivement* ; il serait en quantité insuffisante ou agirait par défaut dans les corps chargés *négativement*.

Dans cette hypothèse, il y aurait véritablement transport ou déplacement de l'éther des

corps chargés positivement vers les corps dont la charge serait négative par rapport aux premiers.)

BONS ET MAUVAIS CONDUCTEURS.

Si la charge développée ou déposée en un point quelconque d'un conducteur y reste stationnaire, le corps est dit *mauvais conducteur*. Si au contraire, la charge envahit toute la masse qu'elle n'avait d'abord affectée que par un point, on a affaire à un corps *bon conducteur*. C'est dans un sens analogue que nous partageons les corps en bons et mauvais conducteurs de la chaleur. Mais, pour l'électricité comme pour la chaleur, les corps conduisent tous ; il n'y a qu'une différence de degré dans la conductibilité. Il n'y en a pas un seul dans lequel la charge électrique ne puisse pas se propager, au moins à une certaine distance.

(La terre étant un bon conducteur, on comprend que pour conserver un corps à un état électrique spécial, on doive ne pas le laisser toucher le sol. Alors on le fait supporter par un mauvais conducteur qui empêche la charge de se perdre. On dit qu'on a ainsi *isolé* le corps ; et les substances qui peuvent servir de barrière à une charge électrique sont dites substances *isolantes* ou *diélectriques*. Tels sont le verre, la

soie, les résines, le bois sec, l'ivoire, etc. Les métaux, les liquides en général, sont de bons conducteurs.)

II

ÉNONCÉ DES LOIS DE COULOMB SUR LES ATTRACTIONS ET LES RÉPULSIONS ÉLECTRIQUES.

(Les corps électrisés agissent à la fois les uns sur les autres et sur ceux qui ne le sont pas. Deux de ces corps, mis en présence l'un de l'autre, tendent à se rapprocher ou à s'éloigner. Il en résulte, dans le milieu qui les sépare, quelle que soit sa nature, un état de tension spéciale, provenant de l'action des molécules électrisées les unes sur les autres. Cette tension peut se manifester plus dans certains cas que dans d'autres. Les directions des actions électriques ont été appelées par Faraday, à qui nous devons cette hypothèse : *lignes de force* ; et l'on est convenu, pour expliquer les phénomènes, de les regarder comme étant plus ou moins nombreuses suivant que l'action des corps électrisés est plus ou moins énergique. En outre, ces lignes représentent les directions et le sens suivant lesquels on imagine l'action de l'énergie électrique. Chacune d'elles est la trajectoire que suivrait une molécule sans inertie, chargée de l'unité d'électricité positive. Dans les corps électrisés positive-

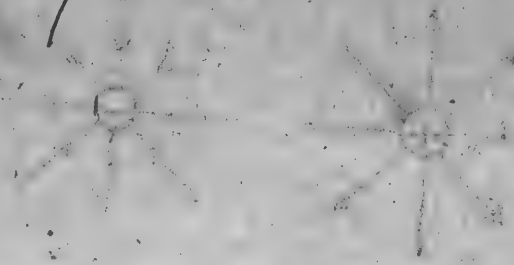
ment, ces lignes sont donc supposées agir de dedans en dehors, de dehors en dedans dans les corps électrisés négativement. (Fig. 1).

Figure 1.

Par conséquent, en mettant en présence deux corps chargés tous deux positivement, les actions électriques doivent se repousser et les lignes devenir de plus en plus divergentes dans l'espace qui sépare les corps ; il en résulte que les corps d'où elles émanent se repoussent eux-mêmes. Au contraire, si l'un des deux est positif et l'autre négatif, les lignes de force entre les deux corps ont une tendance à devenir parallèles, et les deux corps s'attirent.)

C'est Coulomb qui a énoncé le premier les lois des attractions et répulsions électriques. Les voici résumées en une seule : " Les attractions et répulsions électriques sont en raison composée des masses électriques et en raison inverse du carré des distances." Analytiquement :

$$F = \frac{f\, mm'}{d^2}$$



Le signe + correspond évidemment à une répulsion et le signe — à une attraction. L'appareil qui sert à démontrer ces lois est une balance de torsion appelée balance de Coulomb.

MASSES ÉLECTRIQUES, UNITÉ DE MASSE

Comme on ne connaît pas la nature de l'électricité, il est impossible d'évaluer absolument la masse électrique qui a porté un corps à un état électrique donné. Alors, comme pour toutes les mesures physiques, il a fallu prendre un terme de comparaison qu'on a appelé *unité* de masse électrique. C'est " la quantité d'électricité qui, agissant sur une masse égale et semblable à elle-même à l'unité de distance, la repousserait avec une force égale à une dyne." (La dyne est la force qui, agissant sur la masse d'un gramme pendant une seconde, lui donnerait une vitesse d'un centimètre. Une livre pèse 44,600 dynes).

III

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ A L'INTÉRIEUR ET A L'EXTÉRIEUR D'UN CONDUCTEUR.

C'est un fait prouvé par l'expérience que, dans un conducteur en équilibre, c'est-à-dire, où la

charge électrique ne se déplace pas, cette charge ne se manifeste jamais au plan d'épreuve (petit disque isolé) qu'à l'extérieur du conducteur.

C'est là qu'elle paraît se distribuer tout entière. C'est de là qu'elle exerce sur le milieu qui entoure le conducteur une action qui varie avec les circonstances. On peut évaluer la *densité* électrique, c'est-à-dire, la quantité par unité de surface, en touchant successivement les différents points avec le plan d'épreuve que l'on porte chaque fois à la balance de Coulomb. La torsion du fil suspenseur sera plus ou moins grande suivant que la densité elle-même sera plus ou moins grande.

On trouve ainsi que, sur une sphère, la densité est la même partout ; que sur un ellipsoïde, la densité aux pôles est à celle de l'équateur comme l'axe des pôles est à celui de l'équateur.

Mais cette couche électrique est le siège de forces électriques agissant sur le milieu ambiant. Quand le corps est dans l'air, lequel est mauvais conducteur, on peut se figurer cette action comme étant une *pression* dont l'effet est de repousser l'air qui avoisine immédiatement le conducteur. La *tension* du diélectrique qui résulte de cette pression électrostatique est proportionnelle au carré de la densité.

Si, dans l'ellipsoïde dont nous parlions plus

haut, le grand axe de l'ellipse s'allonge indéfiniment, le solide deviendra de plus en plus aigu, et, la tension augmentant en proportion, il arrive un moment où elle est tellement grande qu'elle l'emporte sur la résistance de l'air et la charge se perd dans l'espace, ou mieux se distribue dans l'air qu'elle électrise et qui est alors repoussé par le conducteur.

De là il suit qu'il est impossible de charger un corps muni d'une pointe ou qui présente des angles tant soit peu aigus. C'est le pouvoir des pointes découvert par Franklin, et appliqué par lui dans l'installation des paratonnerres.

IV

ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE

Tout corps qui traverse un champ de lignes de force électriquesdevient lui-même le siège de lignes de force de nom contraire à celles qu'il traverse. Donc, d'un conducteur électrisé on ne pourra pas en approcher un autre, sans que celui-ci ne s'électrise lui-même et ne prenne un état opposé dans la partie qui avoisine immédiatement le premier conducteur. C'est ce que l'on appelle l'*électrisation par influence* ou l'*induction*.

En approchant du conducteur A (Fig. 2) chargé positivement, le conducteur B à l'état neutre,

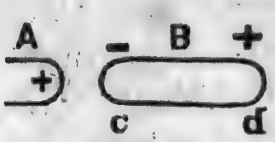


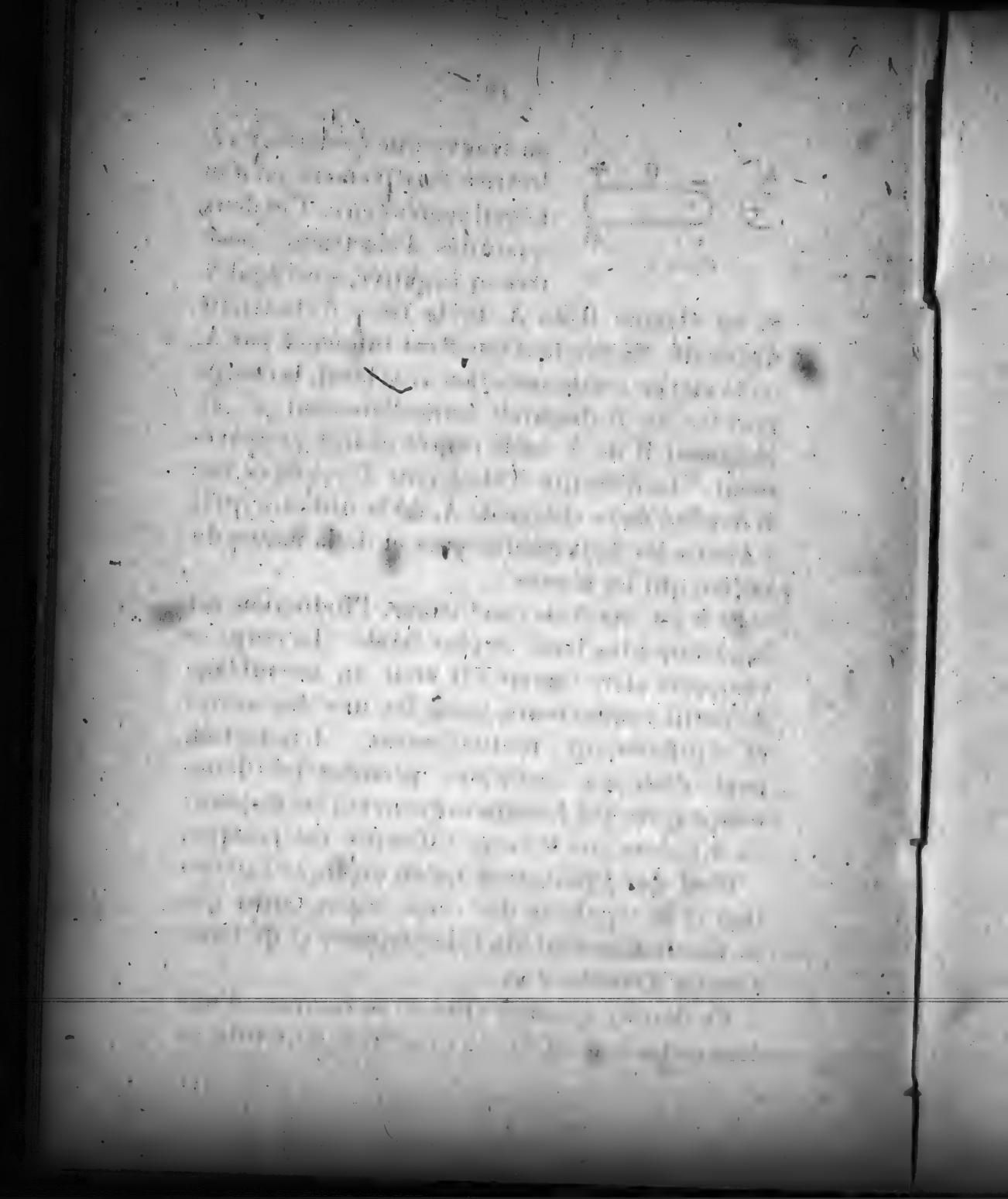
Figure 2.

on trouve que ce dernier s'électrise positivement en *d* et négativement en *c*. Ces deux quantités d'électricité, positive et négative, sont égales. Si on éloigne B de A, toute trace d'électricité disparaît. Si, pendant que B est influencé par A, on le met en communication avec le sol, la charge positive de B disparaît immédiatement, et, en éloignant B de A, on le trouve chargé négativement. La quantité d'électricité développée sur B dépend de la charge de A, de la distance qu'il y a entre les deux conducteurs et de la nature du milieu qui les sépare.

Si B est mauvais conducteur, l'induction est beaucoup plus lente et plus faible. Le corps se comporte alors comme s'il était un assemblage de petits conducteurs, isolés les uns des autres et s'influençant mutuellement. L'induction peut, dans ces conditions, persister très longtemps après que le corps influençant est disparu ; on dit alors que le corps influencé est polarisé.

C'est par l'induction qu'on explique l'attraction et la répulsion des corps légers, ainsi que le fonctionnement de l'électrophore et de l'*électroscope à feuilles d'or*.

Ce dernier appareil (Fig. 3) se compose d'une tige métallique M fixée à l'intérieur d'un tube en



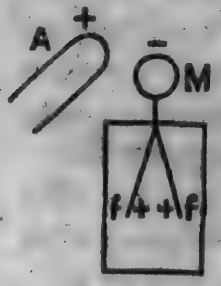


Figure 3.

terre et terminée par deux feuilles d'or *f f*. Si on approche de M un conducteur A chargé, disons positivement, l'ensemble de la tige et des feuilles s'électrise par influence ; la charge négative s'accumule en M et la positive sur les feuilles d'or. Comme celles-ci sont très légères et chargées toutes deux positivement, elles se repoussent et divergent. Pour connaître la nature de la charge du conducteur A, il suffit de toucher un instant M pendant qu'il est sous l'influence de A. Les feuilles retombent immédiatement. Puis on enlève A, les feuilles divergent, chargées qu'elles sont *contrairement* au conducteur A. On approche ensuite *lentement* une charge de signe connu, v. g., positive ; si la divergence diminue, cette charge et celle du conducteur A étaient de même signe. Dans le cas contraire, la divergence augmente.

Cet électroscope est un appareil très simple et en même temps très employé.

V

DÉFINITION DU POTENTIEL PAR L'ÉLECTROMÈTRE OU PAR LE TRAVAIL ÉLECTRIQUE.

Un corps électrisé agit mécaniquement sur les corps voisins. Il y a donc en lui une certaine

capacité de travail. Or cette capacité de travail, ou énergie potentielle, est proportionnelle à son degré d'électrisation. Cette énergie plus ou moins grande est appelée *potentiel* électrique.

(Le potentiel est différent de la tension. En effet, cette dernière dépend de la forme du corps et le potentiel en est indépendant.

Si on met en communication, par un fil fin et long, deux corps qui ne sont pas au même potentiel, il y a toujours un déplacement d'électricité du corps qui a un potentiel plus élevé vers l'autre, et cette effluve ne cesse que lorsque le potentiel est le même sur les deux conducteurs.

La force qui produit la différence du potentiel, cause de ces déplacements, est appelée force *électromotrice*.)

Pour comparer le potentiel de corps différents, il faut un terme de comparaison commun, une unité que l'on prend arbitrairement comme toutes les autres unités. A ce point de vue, si on prend comme unité un certain angle de déviation des feuilles de l'électroscope, tout conducteur qui produira un angle plus grand ou plus petit sera à un potentiel plus ou moins élevé que la charge qui sert de terme de comparaison.

Nous savons encore qu'une masse électrique agit sur le milieu ambiant et que son action s'exerce suivant certaines directions appelées

lignes de force. L'espace occupé par les lignes de force d'un conducteur est appelé *champ* électrique de ce dernier. Alors si l'on vient à faire mouvoir des masses électriques dans ce champ, on verra qu'il y aura un travail à faire, travail qui variera de signe et de valeur suivant que les masses en présence seront de même signe ou de signe contraire, ou qu'elles seront plus ou moins grandes. Ce travail, variant ainsi avec l'énergie ou le potentiel du conducteur, nous permet de donner une nouvelle définition du potentiel. " Le potentiel d'un point quelconque d'un champ électrique est le nombre d'ergs qu'il faut faire pour y amener de l'infini l'unité de masse électrique positive." L'erg est le travail qui se fait quand on élève un poids de 1 dyne à 1 centimètre de hauteur.

(Il est évident que le potentiel n'est pas le même aux différents points d'un champ électrique. Mais dans chaque champ électrique, il y a toujours plusieurs points au même potentiel. Ces points déterminent des surfaces qu'on appelle *surfaces équipotentielles* ou surfaces de niveau électrique.

Le fait que l'électricité est regardée comme se déplaçant toujours des points à potentiel plus élevé aux points à potentiel moins élevé, fait aussi donner au potentiel le nom de niveau électrique. Mais les hauteurs terrestres se me-

surent par rapport à un point de départ qu'on appelle *zéro* ; c'est généralement le niveau de la mer. De même, le potentiel a un point zéro qui est le potentiel de la terre. Les corps plus électrisés que le sol sont à un potentiel positif, ceux qui le sont moins, à un potentiel négatif.)

VI

CAPACITÉ D'UN CONDUCTEUR.

De même que pour élever des poids égaux de différents corps à la même température, il faut leur donner des quantités de chaleur inégales ; de même pour élever des conducteurs différents au même potentiel, il faut des charges différentes. Le potentiel est à la charge électrique ce que la température est à la quantité de chaleur que renferment les corps.

De là une nouvelle propriété appelée *capacité* électrique. " C'est la charge qu'il faut donner à un conducteur pour l'élever au potentiel 1, les corps voisins communiquant avec le sol." Cette capacité dépend uniquement de la forme du conducteur et de sa distance aux corps voisins, contrairement à la capacité calorifique. Elle n'est donc pas une constante.

" L'UNITÉ DE CAPACITÉ est la capacité d'un conducteur dont le potentiel augmente d'une unité

lorsqu'on augmente sa charge d'une unité de masse électrique. On l'appelle le *Farad*. Cette unité, dans le système C. G. S., est beaucoup trop grande. Pratiquement, on en prend la millionième partie ou le *microfarad*.

CONDENSATEURS, LEUR THÉORIE.

La capacité d'un conducteur varie non seulement avec sa forme, mais encore avec la position des corps voisins. C'est en partant de là qu'on peut établir la théorie des condensateurs. On donne ce nom à tout système de conducteurs disposés de manière à augmenter dans une proportion notable la capacité de l'un d'eux. La force condensante est le rapport de la capacité du conducteur seul à la capacité du même conducteur rapproché d'un autre en communication avec le sol. Ou, ce qui revient au même, c'est le rapport direct des charges qui donnent le même potentiel, ou le rapport inverse des potentiels que donne une même charge.

Généralement, les condensateurs se composent de deux lames conductrices, séparées par un diélectrique et mises en communication, l'une avec le sol, l'autre avec une source d'électricité. C'est la lame communiquant avec le sol qui augmente la capacité de l'autre. Voici comment :

Soit un plateau métallique A (Fig. 4) supporté par une tige isolante et mis en communication avec une source d'électricité S, positive, par exemple ; on sait que ce conducteur recevra de l'électricité jusqu'à ce que son potentiel soit devenu égal à celui de la source S. Si à ce moment on isole par la pensée une charge *a* égale à l'unité, le travail que pourra faire cette quantité en passant à la terre donnera la valeur du potentiel de A.

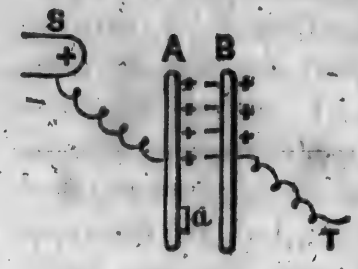
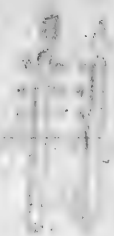


Figure 4.

Si maintenant on place parallèlement à A un autre plateau B semblable, ce dernier se chargera par induction, comme l'indiquent les signes – B et + B. Alors l'unité de charge *a*, en s'écoulant vers la terre, sera soumise à la répulsion de + A et de + B, et à l'attraction de – B ; or – B et + B s'équilibreront, par conséquent la présence du plateau B ne change pas le potentiel de A.

Mais il n'en est plus de même si l'on met B en communication avec le sol T. B ne conservant plus que l'électricité négative, la force qui tend à repousser *a* vers le sol est diminuée de toute l'attraction exercée par – B. Le travail qui pouvait être fourni auparavant sera donc



considérablement diminué. Par conséquent, la présence du plateau B, dans ce dernier cas, diminue le potentiel de A et lui permet ainsi de recevoir de la source de nouvelles charges, jusqu'à ce que les potentiels soient de nouveau devenus égaux. Le plateau B ainsi disposé a donc augmenté la capacité de A, puisque, pour un même potentiel, ce dernier a emmagasiné une quantité plus grande d'électricité.

On remarque que pour un même condensateur la quantité d'électricité nécessaire pour porter la charge à un potentiel donné, toutes choses égales d'ailleurs, varie avec la nature du diélectrique.

(Si le condensateur a une grande surface, comme dans le cas des batteries électriques, l'énergie accumulée sera énorme et produira des effets très violents. La décharge peut chauffer des pièces métalliques jusqu'à les fondre et les volatiliser ; surtout si l'on a affaire à des corps qui conduisent relativement mal, comme des fils métalliques fins. Elle brise les résistances qu'elle rencontre, produit des phénomènes lumineux, des contractions musculaires très vives, etc.

La forme des condensateurs varie à l'infini. Le plus populaire de tous est la bouteille de Leyde. Les condensateurs dont on se sert en pratique se composent de lames d'étain séparées

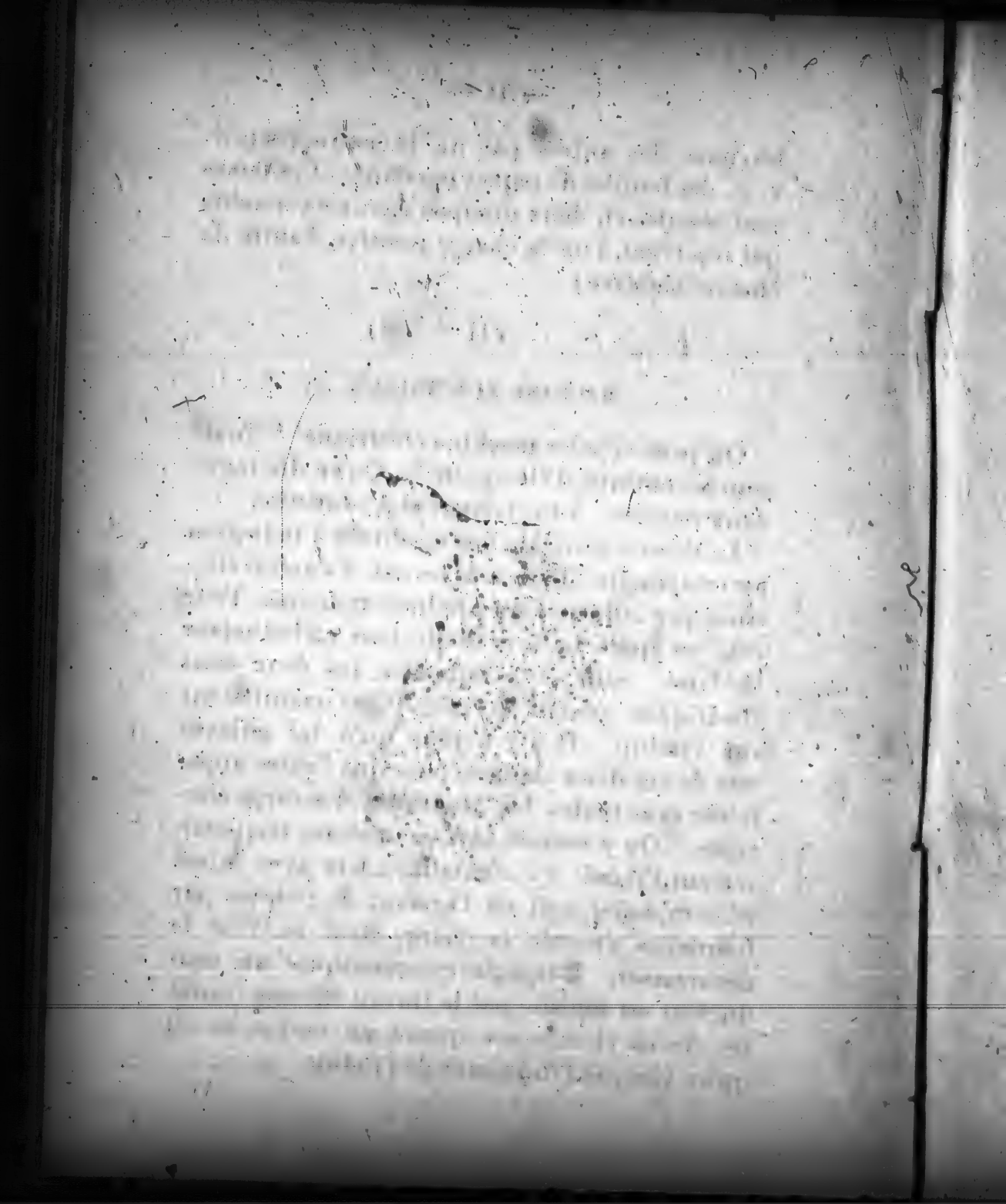
les unes des autres par un isolant approprié, v. g., des feuilles de papier paraffiné. Ces lames sont réunies en deux groupes égaux en nombre qui reçoivent, l'un la charge positive, l'autre la charge négative.)

VII

MACHINE ÉLECTRIQUE.

On peut appeler machine électrique: " Toute source continue d'électricité." On en distingue deux espèces : à frottement et à induction.

La théorie générale des machines à induction est très simple. Dans tous les cas, il s'agit d'électriser par influence un conducteur donné. Pour cela, on approche de ce conducteur un inducteur électrisé. Sous cette influence, les deux états électriques, positif et négatif, se manifestent sur l'induit. Il n'y a plus qu'à lui enlever une de ces deux charges, pour que l'autre apparaisse avec toutes les propriétés des corps électrisés. On y réussit, soit en mettant temporairement l'induit en communication avec le sol (électrophore), soit en l'armant de pointes par lesquelles s'écoule la charge dont on veut le débarrasser. L'énergie communiquée au conducteur est fournie par le travail effectué contre les forces électriques quand on rapproche ou qu'on éloigne l'induisant de l'induit.



De toutes les machines à induction, l'électrophore est la plus simple et la plus facile à décrire.

La plus simple des machines à frottement est la machine à cylindre. Un cylindre E (Fig. 5), tourne autour de son axe en frottant sur le coussin C qui communique avec le sol T. Le frottement charge la demi-surface supérieure de E positivement. Cette charge agit par induction sur le conducteur isolé AB, attire en A la charge négative et repousse en B la charge positive. La charge négative s'échappe par les pointes en A, et, comme elle tombe sur la surface du cylindre, la partie inférieure de ce dernier est toujours à l'état neutre et prête à être électrisée de nouveau par le frottement de C. Il ne reste donc sur AB que la charge positive qui se manifeste par les phénomènes ordinaires.

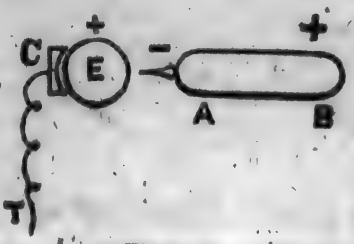


Figure 5.

ÉLECTRODYNAMIQUE ET MAGNÉTISME

VIII

THÉORIE CHIMIQUE DE LA PILE A UN SEUL LIQUIDE, A DEUX LIQUIDES ET A LIQUIDE DÉPOLARISANT.

En plaçant dans un vase plein d'eau acidulée (Fig. 6) deux lames métalliques inégalement attaquables par l'acide, v. g., cuivre et zinc, on trouve que, dès que l'action chimique se produit, le métal le plus attaqué est chargé négativement en dehors du liquide, et le métal non attaqué positivement. L'énergie qui apparaît dans ces deux charges provient de l'action chimique (décomposition de $H_2 SO_4$) qui se produit dans le liquide.

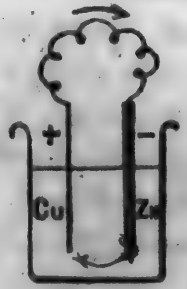
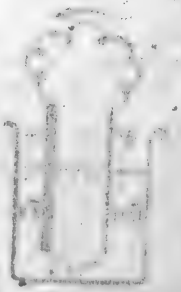


Figure 6.

Si on joint par un fil conducteur les parties extérieures de ces lames (*pôles*), l'électricité passe de la lame de cuivre à la lame de zinc. Mais, comme l'action chimique se continue dans le vase, les



charges électriques reparaissent immédiatement et l'effluve qui se produit dans le fil est continue. Dans le liquide, l'effluve existe également et se fait du zinc au cuivre. Cet appareil porte le nom de *pile hydro-électrique*.

(Dans cette théorie, les charges électriques sur le cuivre et le zinc originent des actions chimiques. Il n'est que juste d'ajouter que ces idées ne sont pas admises par tous et que la théorie du contact, imaginée par Volta, tend à devenir plus en vogue que jamais. Dans cette théorie, la force électromotrice qui produit la différence de potentiel entre le cuivre et le zinc est due tout simplement au contact des deux métaux; ce contact étant suffisant pour établir une différence de potentiel entre les deux. Alors l'action chimique ne serait qu'une conséquence de l'effluve électrique et ne servirait qu'à fournir l'énergie des charges qui se trouvent sur le cuivre et le zinc.)

L'action chimique qui se produit ici est la décomposition de $H_2 SO_4$, avec formation de sulfate de zinc et dégagement d'hydrogène. On remarque que l'hydrogène se dégage uniquement sur la lame de cuivre. Il y forme bientôt une véritable enveloppe gazeuse qui offre une résistance au passage de l'effluve du zinc au cuivre dans le liquide, et qui, de plus, finit par être une source de force électromotrice contraire

à celle de la source primitive. C'est ce que l'on appelle la *polarisation* des électrodes.

Il suit de là que, pour avoir un dégagement constant d'électricité, il faut se débarrasser de l'hydrogène. On y arrive par les piles à deux liquides ou à liquide dépolarisant.

Dans les premières, on fait passer l'hydrogène à travers des solutions qu'il décompose, v. g., le sulfate de cuivre. Naturellement, ce liquide est séparé de l'eau acidulée par une cloison convenable. Le gaz prend la place du cuivre ; il se forme donc de l'acide sulfurique ordinaire et le cuivre se dépose sur la plaque de cuivre, de façon que cette dernière ne subit aucune altération. Telle est la pile de Daniell avec toutes ses modifications. Dans la pile de Bunsen, l'hydrogène traverse une certaine épaisseur d'acide nitrique et est brûlé au passage. Le résultat est toujours de donner un courant plus constant que dans les piles à un seul liquide.

On peut encore empêcher la polarisation en ajoutant à l'eau acidulée un sel très riche en oxygène et facilement décomposable, v. g., le bichromate de potasse ou de soude. L'action chimique provoque la formation d'un alun de chrôme avec dégagement d'oxygène. C'est celui-ci qui brûle l'hydrogène. On obtient ainsi un courant assez constant. Les types de piles au bichromate sont très nombreux.

IX

QU'ENTEND-ON PAR COURANT ÉLECTRIQUE ?

Quand on réunit par un fil conducteur les deux pôles d'une pile électrique, ce conducteur est le siège de propriétés particulières qui se manifestent par des effets calorifiques, lumineux, mécaniques, physiologiques, magnétiques, etc. C'est la cause de ce phénomène, qui ne nous est connu que par ses manifestations, qu'on appelle *courant électrique*. Bien que nous ne sachions pas plus ici que dans le cas de la distribution de la charge électrique d'un conducteur à un autre, s'il y a vraiment déplacement, et encore moins en quel sens il se fait s'il existe, cependant on assimile le courant à un déplacement qui se fait du potentiel plus élevé au potentiel moins élevé, du pôle positif au pôle négatif. En règle générale, il n'y a pas de courant continue à moins que le circuit ne soit absolument complet. Enfin, il ne faut pas oublier qu'il doit y avoir quelque part sur le parcours du courant, des actions chimiques, mécaniques ou autres, qui lui donnent l'énergie qu'il manifeste sur son passage.

ÉNONCÉ DES LOIS DE OHM ET DE JOULE.

Les actions diverses produites par le courant dépendent de sa grandeur ou *intensité*, et celle-ci, à son tour, dépend de la force électromotrice qui le produit et de la résistance plus ou moins grande, qu'il rencontre sur son passage. C'est absolument comme un courant d'eau dont l'énergie mécanique dépend de la quantité d'eau qui passe, de sa pression et des résistances qu'elle éprouve dans les tuyaux de conduite. Ces trois éléments du courant sont reliés entre eux par la loi dite de Ohm, parce que ce savant l'a découverte en 1887, à la suite de considérations toutes mathématiques. Depuis, cette loi extrêmement importante a été vérifiée de toutes les manières possibles.

En voici l'énoncé : " L'intensité d'un courant est proportionnelle à la force électromotrice E et en raison inverse de la résistance électrique R du circuit," ou

$$I = \frac{E}{R}$$

Mais la résistance R est proportionnelle à la longueur l du fil et en raison inverse de sa section s et de son pouvoir conducteur c.

$$R = \frac{l}{s \cdot c}$$

Donc :

$$I = \frac{E \cdot s}{l}$$

D'un autre côté, en désignant par R la resistance du circuit et par r celle de l'électromoteur quel qu'il soit, la formule générale devient :

$$I = \frac{E}{R+r}$$

Si le courant ne produit aucun travail extérieur, ni aucune décomposition chimique autre que celle de la pile qui lui donne son énergie, toute cette dernière apparaît sous forme de chaleur. Joule et Lenz ont étudié ce phénomène à l'aide du calorimètre et ils ont trouvé que : " L'énergie calorifique dégagée dans un conducteur pendant l'unité de temps est égale au produit du carré de l'intensité du courant par la résistance du conducteur," ou

$$J = I^2 R$$

(Il suit de là que partout où les fils s'échauffent, il y a perte d'énergie ; que si l'on veut augmenter la chaleur en un point du circuit, il suffit d'augmenter le courant général ou la résistance en ce point. C'est précisément là-dessus que sont fondées les lampes électriques, quelle que soit leur forme, ainsi que les appareils de chauffage électrique. On crée en un point du circuit une résistance plus grande, le conducteur y est chauffé à une haute température et devient lumineux.)

X

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX DE L'ÉLECTROLYSE DES COMPOSÉS BINAIRES ET TERNAIRES.

Si on coupe le fil interpolaire d'une pile et qu'on en introduise les extrémités dans un liquide, le courant ne traversera pas le liquide, si ce dernier est un isolant parfait comme l'air. Mais si le courant passe, le liquide (le mercure excepté) sera décomposé. Ce phénomène a reçu le nom d'*électrolyse*, le liquide est l'*électrolyte*. L'extrémité du fil communiquant avec le pôle positif de la pile est l'*électrode* positive ou *anode*, l'autre, l'*électrode* négative ou *cathode*.

Les électrolytes paraissent appartenir exclusivement à la classe des matières salines. Ces substances se composent d'un métal uni à un radical, quelquefois simple, comme dans les composés binaires, chlorures, bromures, etc., quelquefois composé, comme dans les composés ternaires, nitrates, sulfates, etc.

Les résultats de la décomposition n'apparaissent que sur les électrodes; le métal sur l'électrode négative et le radical sur l'électrode positive

Ainsi, dans la décomposition de l'eau, l'hydrogène (métal) irait au pôle négatif et l'oxygène (radical) au pôle positif. Dans la décomposition du sulfate de cuivre, $CuSO_4$, Cu va au pôle né-

gatif et SO_4 au pôle positif. Là, SO_4 décompose l'eau et il se forme H_2SO_4 avec dégagement d'oxygène.

Ce phénomène si simple se complique presque toujours d'actions secondaires aux électrodes. Ainsi, si l'électrolyte est $CuSO_4$ et que les électrodes soient en platine (métal inaltérable), les choses se passent comme ci-dessus. Mais si les électrodes sont en cuivre, SO_4 se combine avec un atome de cuivre de l'électrode positive et $CuSO_4$ se reproduit, de façon que l'électrolyte garde toujours la même concentration. C'est l'électrode soluble de la galvanoplastie.

ÉNONCÉ DE LA LOI DE FARADAY.

La quantité de l'électrolyte décomposée dépend uniquement de la quantité d'électricité qui passe. Faraday a énoncé à ce propos la loi suivante qui ne souffre pas d'exception : " L'unité de quantité d'électricité décompose toujours $\frac{1}{96540}$ = 0.00001035 de l'équivalent électro-chimique en poids de l'électrolyte que traverse le courant, " cet équivalent étant exprimé en grammes et rapporté à celui de l'hydrogène pris comme unité. Cette loi s'applique également aux décompositions qui se produisent à l'intérieur de la pile.

(Nous avons là un moyen bien simple de mesurer un courant. Nous savons par l'expérience

que l'unité d'électricité (l'unité de quantité) dépose environ un milligramme d'argent par seconde. Donc, si un courant, pendant ce temps, dépose 2, 3,... milligrammes d'argent, sa force est de 2, 3,... unités de courant. De plus, connaissant la quantité de métal à déposer dans un temps donné, il est facile de calculer la force du courant qui permettra d'atteindre ce but.

Un instrument très simple appelé voltamètre, parce qu'il permet de mesurer un courant voltaïque, est fondé sur ce principe. C'est H_2SO_4 qui en est l'électrolyte.)

PILES SECONDAIRES, ACCUMULATEURS.

Dans l'étude des piles, nous avons vu que le gaz qui s'accumulait sur la lame de cuivre non seulement augmentait la résistance et affaiblissait ainsi le courant, mais encore tendait à établir une force électromotrice opposée à celle de la pile. C'est ce que nous avons appelé : polarisation de la pile.

On démontre facilement ce fait en réunissant par un fil les deux électrodes du voltamètre, après que ce dernier a été traversé un certain temps par le courant d'une pile électrique extérieure. On voit qu'un courant sort du voltamètre, et se fait en sens inverse du premier courant. Le voltamètre constitue donc une véritable *pile secondaire*.

Planté a prouvé qu'on donnait à ces courants secondaires une plus grande régularité et une plus grande intensité, en prenant pour électrodes des lames de plomb plongeant dans l'eau acidulée. Ces piles secondaires ont été improprement appelées *accumulateurs*.

Pendant la charge d'un accumulateur, c'est-à-dire, pendant le passage du courant étranger, la lame positive se recouvre de bioxyde de plomb, et la lame négative reste à l'état de plomb métallique ou se réduit si elle était déjà oxydée. Après la décharge, les deux lames de plomb sont recouvertes de sulfate de plomb.

Les réactions chimiques qui se produisent pendant la charge et la décharge des accumulateurs peuvent s'exprimer par la formule suivante. Le premier membre de l'égalité représente l'état de l'accumulateur après la charge, le second après la décharge :

$$Pb + 2H_2SO_4 + PbO = PbSO_4 + 2H_2O + PbSO_4$$

Le courant de charge change ensuite $PbSO_4$ de la plaque positive en PbO_2 et réduit à l'état métallique le sulfate de plomb de la plaque négative.

On construit actuellement plusieurs autres types d'accumulateurs dont les éléments sont autres que le plomb et l'eau acidulée, et qui donnent d'excellents résultats.

Si on renverse à plusieurs reprises le courant de charge, les deux lames, dans les accumulations du type Planté, s'oxydent et se réduisent successivement. Il se forme une couche poreuse à la surface des lames, une plus grande surface de métal intervient dans le phénomène et l'appareil s'améliore.

On a voulu augmenter encore la surface active en recouvrant les lames avec du minium, ou en leur donnant la forme d'un grillage simple ou double, entre les mailles duquel on emprisonne le minium. Mais ces plaques durent moins longtemps que les lames de Planté. Sans compter que le minium qui s'en échappe trop souvent, peut faire communiquer entre elles les plaques d'un même vase, créer ainsi des courts-circuits et les mettre bientôt hors de service. On tend maintenant à revenir au type Planté.

Dans les accumulateurs qui servent en pratique, on met un grand nombre de ces plaques dans un même vase (Fig. 7), en les réunissant de deux en deux de chaque côté, de manière à faire communiquer un de ces groupes avec un pôle de la source primaire et l'autre avec l'autre pôle.

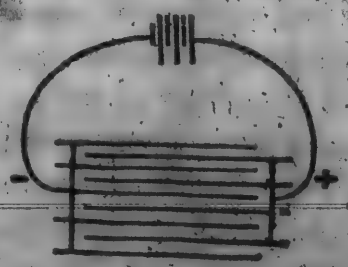
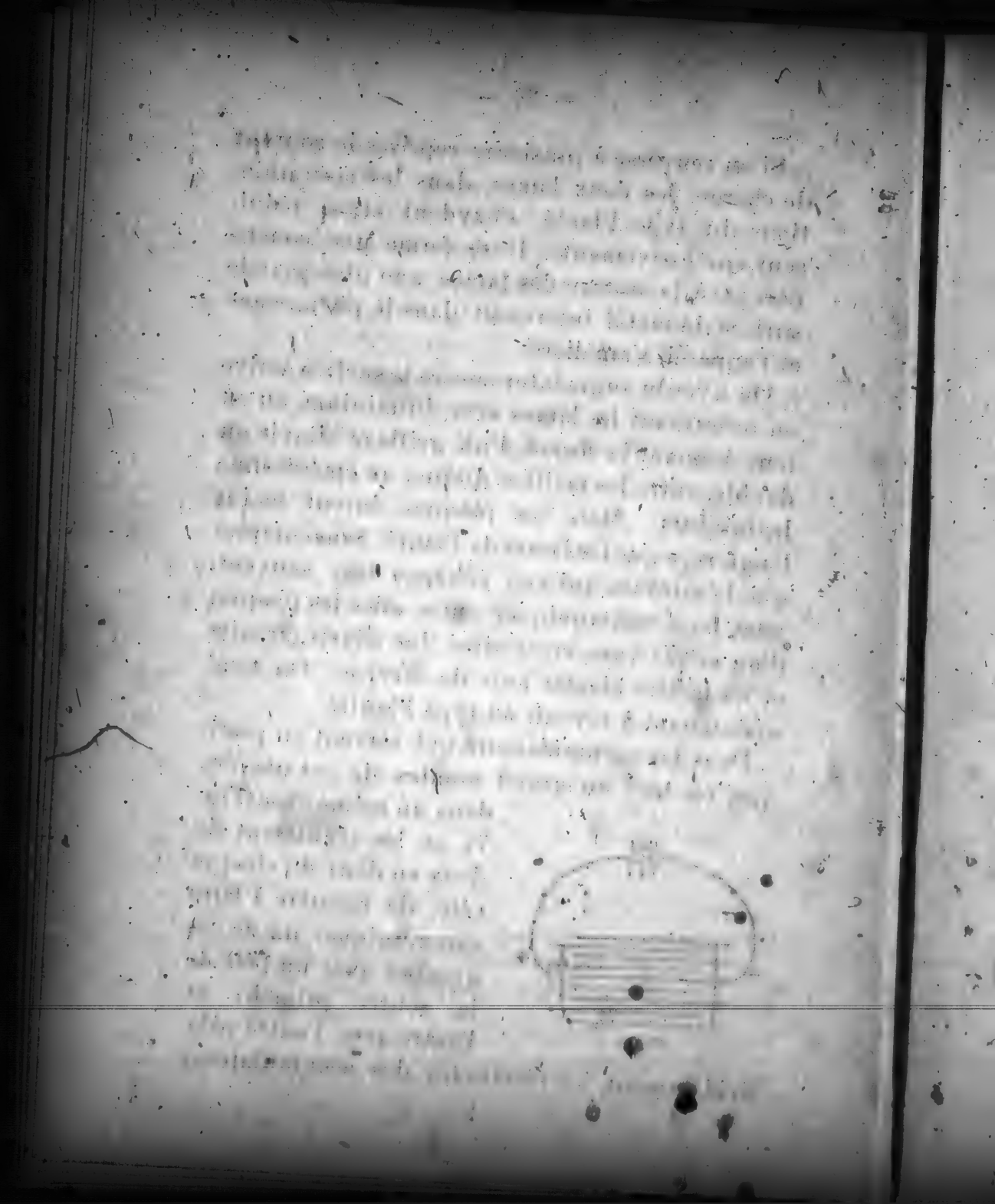


Figure 7.

Evidemment, les électrodes des accumulateurs



gardent la même polarité pendant la charge et la décharge.

Les accumulateurs sont, en Europe surtout, très souvent employés dans les installations d'éclairage électrique.

GALVANOPLASTIE, DORURE ET ARGENTURE.

Ces trois opérations ne sont que des applications de l'électrolyse. On donne plus spécialement le nom de galvanoplastie à la déposition du cuivre que l'on fait se produire sur un objet, soit simplement pour le cuivrage, soit pour en faire la reproduction. On suspend au pôle négatif d'une pile assez forte, dans un bain de sulfate de cuivre, l'objet à cuivrer ou le moule de l'objet à reproduire. Ces pièces doivent auparavant avoir été rendues conductrices par un enduit convenable. Au pôle positif, on accroche une lame de cuivre, afin de maintenir le bain au même degré de concentration, puis on laisse passer le courant jusqu'à ce que le dépot métallique ait l'épaisseur voulue.

Pour la dorure et l'argenture, on commence par nettoyer avec beaucoup de soin les objets à dorer ou à argenter, afin d'avoir un dépôt qui soit bien adhérent ; puis on les plonge dans un bain de sels d'or ou d'argent solubles, dans les mêmes conditions que pour le cuivrage.

XI

COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES

Si l'on chauffe la soudure qui réunit deux métaux différents, il s'établit immédiatement une différence de potentiel aux deux extrémités froides. Et, si on réunit celles-ci par un conducteur, on a un courant dont l'intensité et le sens dépendent des métaux en contact et de la température de la soudure, comparée à celle des extrémités froides. Ce phénomène prouve que l'effet de contact, dans la théorie de Volta, est une fonction de la température. Toutefois, on doit admettre que la force électromotrice qui se développe dans les couples thermo-électriques n'est pas due exclusivement au contact des métaux accouplés.

Les courants qui se produisent ainsi dans des circuits métalliques composés de plusieurs métaux, dont les soudures sont maintenues à des températures différentes, s'appellent : *courants thermo-électriques*.

Le bismuth et l'antimoine sont les deux métaux dont la réunion développe la force électromotrice la plus grande. Cependant cette force est toujours très faible. Pour un couple comme celui-là et une différence de température des soudures égale à un degré centigrade, elle n'est que 0.000057 de celle d'un élément Daniell.

On peut rendre les courants plus intenses en réunissant plusieurs couples bismuth et antimoine, comme l'indique la figure 8, et en maintenant entre les deux séries de soudures une différence de température invariable et assez élevée. Bi est toujours positif par rapport à Sb. C'est sur ce principe que sont faites les piles thermo-électriques, dont la plus célèbre est le thermo-multiplicateur de Melloni. Ce dernier appareil est infiniment plus sensible à la chaleur que le meilleur thermomètre ordinaire. On connaît l'usage qu'on en fait pour l'étude de la chaleur rayonnante et des autres phénomènes délicats du calorique.

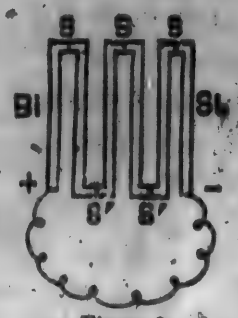
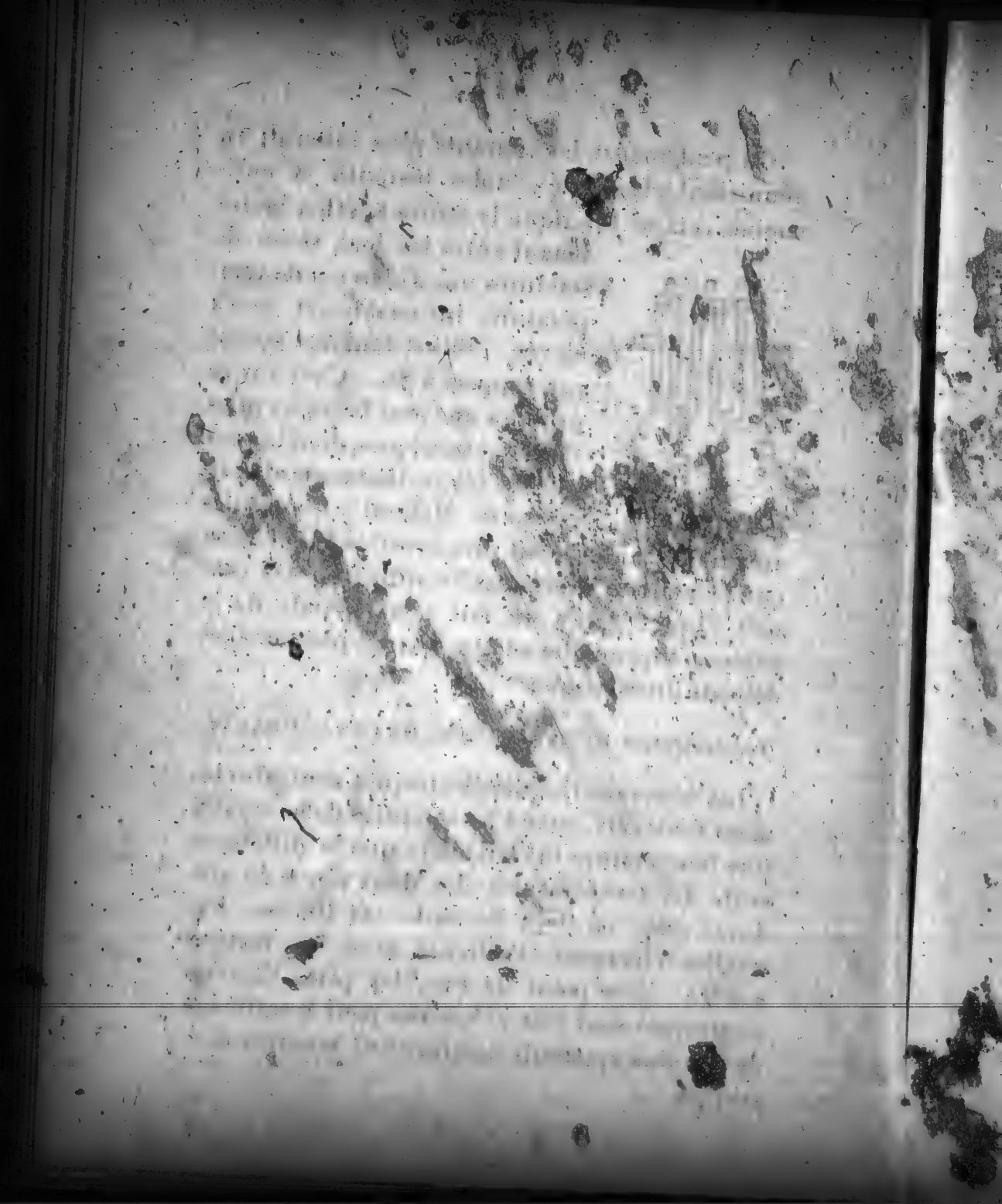


Figure 8.

PRODUCTION ET CARACTÈRES DE CES COURANTS.

Les courants thermo-électriques sont absolument constants, quand les soudures demeurent à une température invariable et que la différence entre les températures des deux séries de soudures reste en deçà de certaines limites, lesquelles changent d'ailleurs avec les métaux soudés. A ce point de vue, les piles thermo-électriques sont très précieuses pour le calibrage de certains appareils destinés aux mesures électriques.



Les courants thermo-électriques ont une très faible tension, mais comme la résistance intérieure de ces piles est beaucoup plus faible que celle des piles hydro-électrique, on peut en obtenir des courants assez intenses.

Ces courants d'ailleurs ne diffèrent des courants hydro-électriques par aucune propriété essentielle.

XII

AIMANT.

On appelle PIERRE d'AIMANT ou AIMANT NATUREL l'oxyde de fer Fe_3O_4, qu'on trouve abondamment dans la nature. Cette pierre attire la limaille de fer ; mais, en la roulant dans cette dernière, on trouve que la limaille s'accumule surtout en certains points et qu'il n'en reste pas ailleurs.

Il suffit de frotter un morceau d'acier avec la pierre d'aimant pour qu'il acquierre à son tour la propriété d'attirer la limaille de fer. On dit alors que l'acier est aimanté. Ces aimants d'acier sont appelés ; *aimants artificiels*. Ce sont à peu près les seuls employés. Car on peut leur donner facilement la forme que l'on veut et les faire plus énergiques que les pierres d'aimant.

PÔLES, LIGNE NEUTRE.

Si l'on jette de la limaille de fer sur un barreau aimanté, on voit qu'elle s'accumule surtout sur certains points qui semblent être des centres d'attraction magnétique. Ce sont les *pôles* de l'aimant. Entre deux pôles voisins, se trouve un espace qui n'attire pas la limaille ; c'est la *ligne neutre*. Il y a toujours au moins deux pôles dans un aimant. S'il y en a plus, l'aimantation a développé ce que l'on appelle des *points conséquents*.

A première vue, rien ne distingue les pôles les uns des autres. Mais si l'on suspend deux barreaux aimantés de façon à ce qu'ils puissent tourner dans un plan horizontal, on les voit s'orienter tous deux vers le même point de l'horizon. Une de leurs extrémités se dirige vers le nord, l'autre vers le sud. Rapprochons alors l'une de l'autre les extrémités qui se dirigent vers le nord ou celles qui se dirigent vers le sud : elles se repoussent. Rapprochons d'une extrémité nord une extrémité sud : elles s'attirent. De ces faits on déduit la loi suivante : " Les pôles de même nom se repoussent ; les pôles de nom contraire s'attirent ".

ÉNONCÉ DE LA LOI DE COULOMB SUR LES ACTIONS MAGNÉTIQUES.

Nous constatons une fois de plus dans les aimants une force capable d'agir au dehors et d'y produire certains effets mécaniques. Cette force, évidemment, dépend du degré d'aimantation et de la distance qui sépare l'aimant du corps sur lequel il agit. Or la force d'aimantation peut s'évaluer, comme toutes les forces électriques, en convenant de prendre pour terme de comparaison ou unité une certaine quantité ou masse magnétique. L'unité de masse magnétique est celle qui, agissant sur une masse égale à elle-même à l'unité de distance, la repousse ou l'attire avec une force égale à une dyne.

Alors on devra trouver une relation entre l'énergie des actions magnétiques et les masses magnétiques. Cette relation, ainsi que celle qui se rapporte à l'influence de la distance sur les actions magnétiques, est exprimée par la loi de Coulomb. En voici l'énoncé : " Les actions magnétiques varient proportionnellement aux masses magnétiques et en raison inverse du carré des distances," ou

$$F = \frac{+ m m'}{d^2}$$

Coulomb a démontré cette loi par la balance de torsion qui lui avait servi à démontrer les lois des actions électriques.

CHAMP MAGNÉTIQUE, LIGNES DE FORCE.

La loi des actions magnétiques et électriques étant la même, tout ce que nous avons dit du champ électrique peut s'appliquer au champ magnétique ; avec cette réserve toutefois que les masses magnétiques sont absolument fixes et ne tendent pas à passer d'un endroit à un autre. Il y aura donc un potentiel magnétique qui se définira et se calculera comme le potentiel électrique. Il y aura aussi des surfaces de niveau et le potentiel d'un point sera le nombre d'ergs qu'il faudra faire pour y amener de l'infini l'unité de masse magnétique nord. Cependant, il ne faut pas croire que cette ressemblance aille jusqu'à l'identité des propriétés. La force électrique n'a aucune action sur la force magnétique.

Cette quasi-similitude étant admise, rien d'étonnant si l'on trouve que la force magnétique agit suivant des directions spéciales, suivant des *lignes de force*, absolument comme les forces électriques. L'ensemble des lignes de force d'un aimant constitue le champ de cet aimant. Dans les circonstances ordinaires, les champs des aimants sont loin d'être uniformes. Les lignes sont plus ou moins nombreuses, plus ou moins énergiques et décrivent des courbes plus ou moins compliquées qui les empêchent d'être parallèles.

Le champ en lui-même est illimité, à moins qu'on y mette certains écrans métalliques, v. g., des lames épaisses de fer, qui paraissent absorber les lignes de force. Enfin, comme on n'a pas affaire ici à une couche essentiellement superficielle, mais que l'aimantation atteint les couches profondes de l'aimant, on doit s'attendre à ce que les lignes de force ne soient pas toujours perpendiculaires aux surfaces d'où elles émanent, comme les lignes du champ électrique.

Comme pour les lignes de force électriques, on est convenu de dire que les lignes de force magnétiques émanent d'une région positive (pôle nord) pour aboutir à une région négative (pôle sud).

On met ces lignes de force en évidence en coupant, dans une direction quelconque, avec un carton saupoudré de limaille de fer un champ magnétique donné. La limaille se dispose en traînées plus ou moins nombreuses suivant que le champ magnétique renferme plus ou moins de lignes de force; et de plus, ces bandes de limaille indiquent les directions elles-mêmes des lignes du champ que l'on étudie. L'ensemble de ces lignes, matérialisées pour ainsi dire par la limaille, forme ce que l'on appelle un *fantôme* magnétique. Ces fantômes sont très intéressants à étudier; surtout si l'on dispose près l'un de l'autre, deux pôles de même nom ou de

nom contraire. Dans le premier cas, les lignes divergent d'un pôle à l'autre dans l'espace qui sépare ces derniers ; elles convergent dans l'autre cas.

XIII

UN PROCÉDÉ D'AIMANTATION.

Le procédé d'aimantation le plus simple consiste à frotter le barreau à aimanter avec le pôle d'un aimant artificiel donné. Le frottement doit se faire d'un bout à l'autre du barreau à aimanter, sans arrêt, toujours dans le même sens et successivement sur les différentes faces du barreau à aimanter. On développe ainsi un pôle, de nom contraire à celui avec lequel on frotte, à cette extrémité du barreau à aimanter que l'aimant frotteur touche en dernier lieu.

Il y a encore d'autres procédés capables de donner une aimantation plus énergique ; nous en verrons quelques-uns à propos des électro-aimants.

XIV

CHAMP TERRESTRE

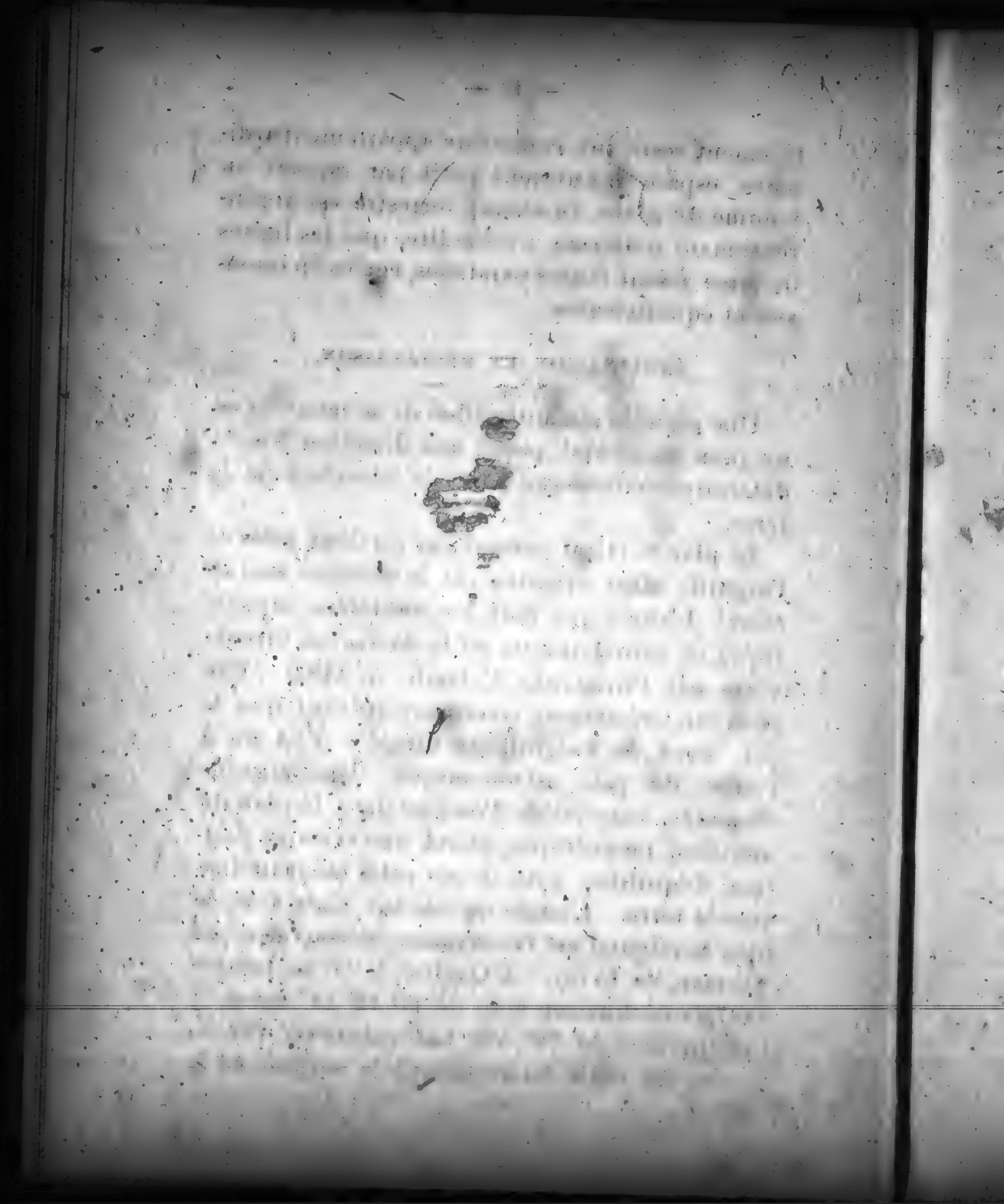
Le voisinage de la terre est un champ magnétique, puisque, comme nous l'avons vu plus haut, une aiguille aimantée tend à y prendre une direction déterminée. Pour un espace rela-

tivement restreint, comme un appartement ordinaire, espace infiniment petit par rapport au volume du globe, le champ terrestre est rigoureusement uniforme, c'est-à-dire, que les lignes de force y sont toutes parallèles, égales en intensité et équidistantes.

INCLINAISON ET DÉCLINAISON.

Une aiguille aimantée libre de se mouvoir en un plan horizontal, prend une direction fixe et déterminée en chaque point de la surface de la terre.

Le plan vertical passant par les deux pôles de l'aiguille ainsi orientée est le *méridien magnétique*. L'angle que font les méridiens magnétique et astronomique est la *déclinaison* (découverte par Christophe Colomb, en 1482) Elle peut être *orientale* ou *occidentale*, suivant que le pôle nord de l'aiguille se dirige à l'est ou à l'ouest du pôle astronomique. Une aiguille aimantée, susceptible d'osciller dans le plan du méridien magnétique, prend une certaine position d'équilibre, l'un de ses pôles étant incliné vers la terre. L'angle qu'elle fait alors avec le plan horizontal est l'*inclinaison* (découverte par Norman, en 1576). A Québec, le 16 septembre 1887, la déclinaison était de 17° 12' 14" ouest, et l'inclinaison de 76° 5'. Les points où l'inclinaison est nulle déterminent à la surface de la



terre une ligne qu'on appelle *équateur magnétique*. Les lignes *isogones* sont les lignes de même déclinaison ; les *isoclines*, celles de même inclinaison.

Les points du globe terrestre où l'inclinaison égale 90° sont les *pôles magnétiques*. Ils ne coïncident pas avec les pôles astronomiques. C'est pour cette raison que l'inclinaison et la déclinaison varient d'un endroit à l'autre du globe, et que la dernière est orientale pour un pays et occidentale pour un autre. De plus, les choses se passent comme si les pôles magnétiques se déplaçaient en tournant autour des pôles astronomiques. Ainsi, la déclinaison subit des variations séculaires plus ou moins grandes, et, pour un même pays, elle peut être tantôt orientale et tantôt occidentale. Ces deux quantités subissent encore des variations diurnes régulières et des variations accidentelles. Ces dernières ont une relation bien marquée avec les aurores boréales et les taches solaires.

XV

ACTION MUTUELLE DE LA TERRE, DES AIMANTS, DES SOLÉNOÏDES ET DES COURANTS.

Action mutuelle des courants et des aimants.— Nous connaissons déjà l'action mutuelle de la terre et des aimants, qui est de diriger l'aiguille

aimantée dans la direction de l'aiguille d'inclinaison. Œrsted a découvert que si l'on fait passer un courant dans un conducteur disposé parallèlement à l'axe d'une aiguille aimantée, cette aiguille tend à se mettre en croix avec le conducteur, son pôle nord étant placé à gauche du courant. Ampère est le premier qui ait formulé cette règle. (La gauche du courant est celle d'un individu placé dans le conducteur de telle façon que le courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête et qu'il ait la face tournée vers l'aiguille aimantée). Evidemment, si dans l'expérience ci-dessus l'aiguille est fixe et le courant mobile, ce sera ce dernier qui se mettra en croix avec l'aiguille.

De ces faits on conclut que, dans l'action de la terre sur les aimants, les choses se passent comme si la terre était parcourue par un courant allant de l'est à l'ouest. L'hypothèse de ce courant terrestre sert encore à expliquer l'action de la terre sur les solénoïdes et sur les courants.

Action mutuelle des courants les uns sur les autres. —Chaque courant engendre un champ électromagnétique formé de lignes de forces magnétiques circulaires. On peut mettre ce fait en évidence en saupoudrant de limaille de fer un carton traversé perpendiculairement par un courant. La limaille se dispose en lignes circulaires qui entourent le conducteur.

Rien d'étonnant alors si l'on constate une action mécanique des courants les uns sur les autres, du moment que leurs champs se touchent ou se compénètrent.

ÉNONCÉ DES LOIS D'AMPÈRE.

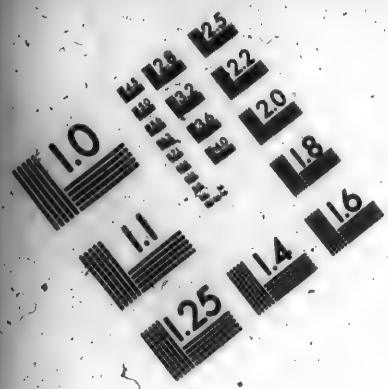
Ampère a formulé le premier toutes les lois de l'électrodynamique. De l'énoncé de la loi générale qui est exclusivement mathématique, on tire les déductions suivantes :

1. Deux courants parallèles s'attirent s'ils sont de même sens et se repoussent s'ils sont de sens contraire.

2. Deux courants angulaires s'attirent s'ils s'approchent ou s'éloignent à la fois du sommet de l'angle ; ils se repoussent, si l'un s'approche et que l'autre s'éloigne du sommet.

3. Un courant sinueux a le même effet qu'un courant droit dont la longueur égalerait la projection du courant sinueux sur une ligne droite parallèle à l'axe du courant sinueux.

Il résulte de ces lois que, dans le cas des courants mobiles, il y a mouvement ou déplacement jusqu'à ce que les courants aient pris des positions relatives qui satisfassent à ces conditions. C'est de cette manière que s'explique la rotation des courants mobiles, l'orientation des courants verticaux, etc., en un mot, tous les phénomènes de l'électrodynamique proprement dite.



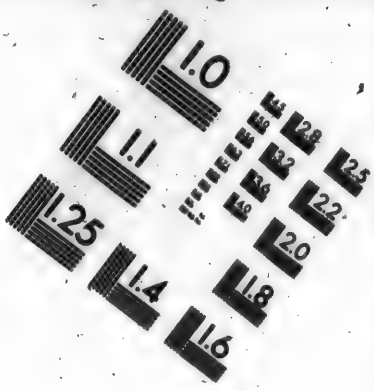
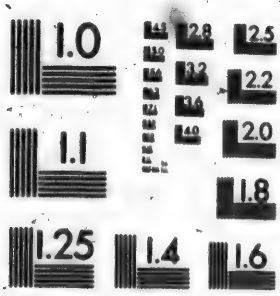
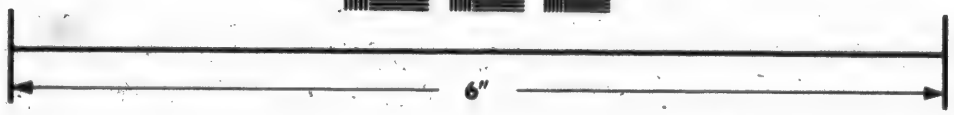
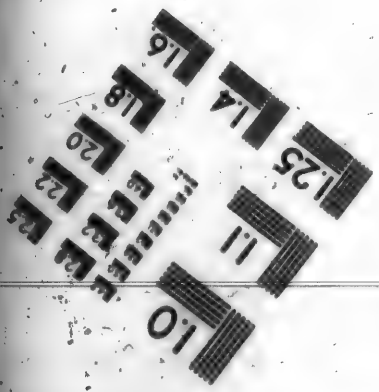
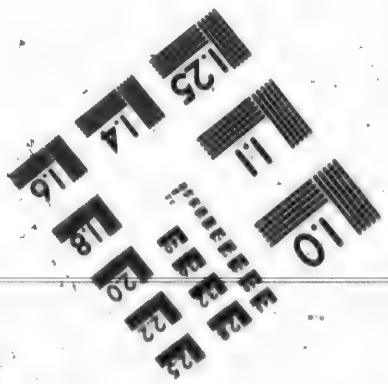


IMAGE EVALUATION
TEST TARGET (MT-3)









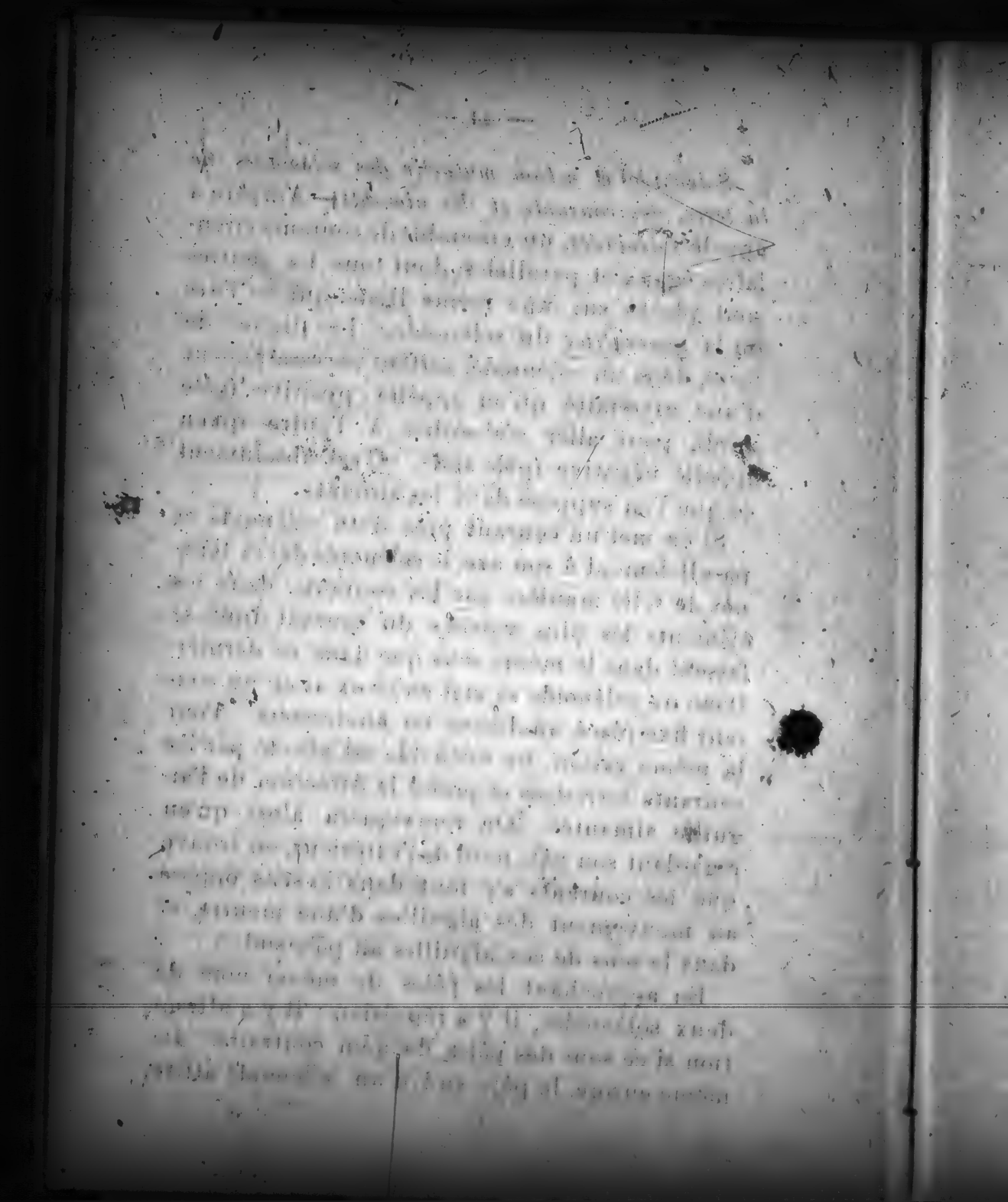
Photographic Sciences Corporation

23 WEST MAIN STREET
WEBSTER, N.Y. 14580
(716) 872-4503

Solénoïdes et action mutuelle des solénoïdes, de la terre, des courants et des aimants.— Ampère a appelé *solénoïdes*, un ensemble de courants circulaires égaux et parallèles, dont tous les centres sont placés sur une même ligne, qui est l'*axe* ou la *génératrice* du solénoïde. Les lignes de force, dans un solénoïde, sortent nécessairement d'une extrémité qu'on appelle positive (pôle nord), pour aller s'absorber à l'autre qu'on appelle négative (pôle sud). C'est absolument ce que l'on suppose dans les aimants.

Si on met un courant près d'un solénoïde et parallèlement à son axe, le solénoïde devra tourner de telle manière que les courants, dans les éléments les plus voisins du courant droit, se fassent dans le même sens que dans ce dernier. Donc un solénoïde se met en croix avec un courant fixe placé au-dessus ou au-dessous. Pour la même raison, un solénoïde est affecté par les courants terrestres et prend la direction de l'aiguille aimantée. On remarquera alors qu'en regardant son pôle nord de l'extérieur, on trouve que les courants s'y font dans le sens opposé au mouvement des aiguilles d'une montre, et dans le sens de ces aiguilles au pôle sud.

En approchant les pôles de même nom de deux solénoïdes, il y a répulsion ; il y a attraction si ce sont des pôles de nom contraire. De même encore, le pôle sud d'un solénoïde attire



le pôle nord d'une aiguille aimantée et repousse le pôle sud et vice-versâ pour le pôle nord.

C'est cette similitude absolue entre les propriétés des solénoïdes et des aimants qui a fait regarder ces derniers comme des solénoïdes magnétiques. Dans cette hypothèse, les courants au pôle nord d'un aimant se font, comme ceux des solénoïdes, dans le sens opposé au mouvement des aiguilles d'une montre ; dans le sens de ces aiguilles au pôle sud. On suppose qu'on regarde toujours ces pôles de l'extérieur.

Encore une fois, tous ces faits ne sont que des déductions des lois d'Ampère.

XVI

ÉLECTRO-AIMANTS.

Arago avait découvert en 1820, qu'un fil où circulait un courant attirait la limaille de fer, et que par conséquent, les lignes de force du courant développaient des lignes de force magnétiques. C'était un fait à peu près analogue à l'induction électrique que nous avons déjà vue.

Ampère a rendu ce développement des lignes de force magnétiques, c'est-à-dire, l'aimantation, beaucoup plus intense en enroulant le courant en spirale et en plaçant une tige de fer ou d'acier à l'intérieur de cette spirale. Il a remarqué alors que ces deux substances s'aimantaient ; l'acier

restant aimanté et le fer doux perdant son aimantation dès que le courant cessait. On disait autrefois, pour expliquer cette propriété spéciale de l'acier, que ce dernier avait une force *coercitive*. Le fer doux était regardé comme en étant dépourvu. L'explication a été depuis modifiée. On regarde maintenant le fer doux comme étant plus perméable que l'acier aux lignes de force. Mais d'un autre côté, si cette perméabilité est plus grande, les lignes de force le traversent sans laisser de traces de leur passage. L'aimantation, pendant que le courant passe, est très forte, plus forte et surtout plus rapide que dans l'acier, mais elle disparaît presque complètement quand le courant est interrompu.

La faible aimantation qui persiste dans le fer doux après le passage du courant constitue le *magnétisme rémanent*. Il varie en intensité avec la pureté du fer. En général, plus la perméabilité est grande, plus il est faible. Dans l'acier la perméabilité est faible, et le magnétisme rémanent égale à peu près l'aimantation par le courant direct. Voilà pourquoi un barreau d'acier, dans ces circonstances, reste définitivement aimanté.

On appelle *électro-aimants* des barreaux de fer doux sur lesquels on enroule une spirale de fil de cuivre isolé. Dès qu'un courant circule dans ce fil, il se développe à chaque extrémité du

barreau des pôles magnétiques absolument semblables aux pôles de l'espèce de solénoïde que constitue l'hélice du fil conducteur. On peut donc, en variant le sens du courant ou l'enroulement du fil, créer à un bout donné du fer doux le pôle magnétique que l'on veut.

THÉORIE D'AMPÈRE SUR LE MAGNÉTISME.

Cette théorie fait entrer tous les phénomènes magnétiques dans l'électrodynamique.

" Au lieu d'attribuer, dit Maneuvrier, les phénomènes magnétiques à l'existence de deux fluides particuliers, Ampère les attribua à des courants circulaires, préexistant autour de chaque particule des substances magnétiques. Quand ces substances ne sont pas aimantées, leurs courants particulaires sont enchevêtrés dans tous les sens, et la résultante de leurs actions dynamiques est nulle ; mais sous l'influence d'un aimant ou d'un courant puissant, ces courants s'orientent et prennent une position d'équilibre, conformément aux lois de l'électrodynamique ; non seulement ils sont orientés alors dans le même sens et dans des plans parallèles, mais leurs centres sont disposés en séries linéaires parallèles à l'axe du barreau qu'on aimante, en sorte que celui-ci devient un véritable *faisceau* de solénoïdes, dont l'ensemble agit comme un solénoïde unique."

XVII

CONDITIONS DE L'INDUCTION PAR LES COURANTS ET PAR LES AIMANTS.

Nous savons déjà qu'un courant est entouré par un certain nombre de lignes de force circulaires qui constituent son champ. Si le courant augmente, de nouvelles lignes de force apparaissent près du fil conducteur et repoussent plus loin les lignes déjà existantes. Le champ augmente en intensité. L'inverse se produit si le courant diminue ; alors les choses se passent comme si les lignes de force rentraient dans le conducteur. La même chose arrive par rapport aux lignes de force d'un champ magnétique. Leur nombre augmente ou diminue suivant que l'aimantation devient plus forte ou plus faible.

Faraday a découvert que chaque fois qu'un conducteur traverse un champ de lignes de force, il devient lui-même le siège d'un courant. On appelle ce courant : *courant d'induction* ou *courant induit*. La source des lignes de force qui constituent le champ où se fait l'induction est l'*inducteur* ou le courant *inducteur*.

Pour qu'il y ait induction, il faut que le fil induit soit coupé par des lignes de force ou les coupe lui-même. De plus, le courant induit n'existe que pendant que le conducteur traverse les lignes de force d'un champ donné. S'il y

reste immobile et que le champ ne varie pas, ou s'il se déplace parallèlement aux lignes de force, quelle que soit l'intensité de ces dernières, aucun courant induit ne se produit.

On peut donc créer des courants induits en faisant mouvoir le fil induit dans un champ électro-magnétique quelconque, celui de la terre, d'un aimant ou d'un courant ordinaire ; ou bien en fermant ou ouvrant, en augmentant ou diminuant l'inducteur.

ÉNONCÉ DE LA LOI DE LENZ.

Le sens du courant induit est donné par la loi de Lenz qui peut s'énoncer ainsi : " Le sens du courant induit est toujours tel que ce courant s'oppose, par son action électro-magnétique, à la cause qui le produit. " C'est précisément de la force mécanique nécessaire pour vaincre cette résistance que le courant induit tire son énergie. De là on conclut que si le courant inducteur commence, se rapproche ou augmente, le courant induit sera inverse ; s'il finit, s'éloigne ou diminue, l'induit sera direct.

SELF-INDUCTION, EXTRA-COURANT.

Supposons un conducteur enroulé en spirales, quand le courant commencera ou cessera dans une spirale, celle-ci induira successivement

dans ses voisines un courant inverse et un courant direct. Ces spirales se comportent donc comme des conducteurs isolés et s'induisent les unes les autres. C'est ce phénomène qu'on appelle *self-induction*, et le courant secondaire qui en résulte constitue l'*extra-courant*.

D'après les règles de l'induction, l'extra-courant de fermeture est inverse ; celui d'ouverture, direct. Le premier a pour effet de diminuer le courant primaire ou, équivalemment, d'augmenter la résistance du circuit. Le second au contraire augmente le débit.

Voilà pourquoi, dans un circuit long et à nombreuses spirales, l'étincelle d'ouverture est toujours plus forte que l'étincelle de fermeture. La self-induction varie avec la nature du fil inducteur. Elle est beaucoup plus forte dans un fil de fer que dans un fil de cuivre.

BOBINE DE RUHMKORFF, TRANSFORMATEURS.

On appelle *transformateurs* en général tout appareil ayant pour but de transformer l'énergie électrique, en lui donnant des propriétés nouvelles, qu'elle ne possédait pas avant de traverser le transformateur.

On appelle plus spécialement transformateurs, ceux de ces appareils destinés à transformer les courants alternatifs, et *bobines d'induction* ceux qui utilisent le courant discontinu ou alternatif

d'un générateur électrique. Il résulte de là que les transformateurs, quels qu'ils soient, se composent toujours essentiellement de deux fils enroulés très près l'un de l'autre. Le courant inducteur passe dans l'un de ces conducteurs (fil ou courant *primaire*), et le courant induit (courant *secondaire*) se développe dans l'autre circuit

BOBINE DE RUHMKORFF.

C'est un transformateur à l'aide duquel on cherche, avec un courant primaire intense mais d'une force électromotrice assez faible, à produire dans le fil induit une force électromotrice relativement très grande, de manière à faire toutes les expériences d'électricité à haute tension.

Sur un noyau de fer doux est enroulé le fil primaire, gros et court. Autour de celui-ci, mais séparé par un isolant, est enroulé le fil secondaire, très long et très fin, à spirales parfaitement isolées les unes des autres. Le courant primaire est généralement celui d'une pile dans le circuit de laquelle on place un interrupteur convenable. A chaque ouverture et fermeture du courant primaire, il se développe dans le fil fin un courant d'induction alternativement direct et inverse ; et la force électromotrice du courant induit est d'autant plus grande que son intensité est plus faible.

En effet, si l'on représente par E et I la force électromotrice et l'intensité du courant primaire, et par E' et I' les valeurs correspondantes du courant secondaire, on devra avoir :

$$EI = E'I'$$

L'expérience a prouvé que cette condition est réalisable à peu de chose près.

Or dans le second membre, I' diminuera avec l'augmentation de la résistance du circuit ou la longueur du fil, donc E' sera d'autant plus grand que le fil sera plus long et plus fin.

De plus, comme la tension du courant induit dépend de la rapidité d'interruption du courant inducteur, il faut que cette interruption se fasse aussi vite que possible. De là le remplacement de l'interrupteur à marteau par l'interrupteur à mercure recouvert d'alcool, l'alcool étant un diélectrique bien plus efficace que l'air de l'interrupteur à marteau.

Les grosses bobines de Ruhmkorff donnent des étincelles énormes. On constate que le courant direct d'induction a, en général, plus de tension que le courant inverse ; pour peu que les extrémités de l'induit soient éloignées l'une de l'autre, l'étincelle du courant direct traverse seule l'espace entre les deux fils. La quantité de ces deux courants est la même, car si l'on fait

communiquer le fil induit avec un galvanomètre, on n'observe aucune déviation.

TRANSFORMATEURS PROPREMENT DITS.

Ces appareils ne s'emploient guère qu'avec des dynamos à courants alternatifs. Ils sont construits d'après le même principe que les bobines d'induction, avec cette différence toutefois que le circuit magnétique doit être fermé, c'est-à-dire, complet, tandis qu'il ne l'est pas dans les bobines d'induction.

Leur construction varie à l'infini, mais on peut les rapporter à deux types : l'un à noyau, l'autre à enveloppe de fer doux.

Ils fonctionnent à l'inverse pour ainsi dire des bobines d'induction. Dans celles-ci, en effet, on change un courant intense mais de faible tension en un courant faible mais de haute tension ; tandis que, dans les transformateurs, on remplace un courant de haute tension par un courant de faible tension ; l'intensité varie naturellement en sens inverse. Dans les deux cas d'ailleurs, si la transformation s'est faite sans perte d'énergie, on devra avoir :

$$EI = E'I'$$

Les transformateurs sont appelés à jouer un rôle considérale dans le transport à distance de l'énergie électrique.

Par exemple, pour transporter une certaine quantité d'énergie électrique à quelques milles, il faudra, si on a un courant de faible tension mais de grande quantité, un conducteur très gros et très dispendieux ; car, avec un fil fin, on perdrait en route une grande partie de l'énergie qui se dissiperait inutilement en chauffant les fils ; tandis que l'on peut transporter la même quantité d'énergie avec un fil beaucoup plus fin, si on se sert d'un courant réellement faible mais de grande tension. Car l'énergie électrique est toujours mesurée par le produit de l'intensité par la force électromotrice.

A l'arrivée, il suffira de faire passer le courant dans le fil fin d'un transformateur, pour que le gros fil débite un courant très intense mais d'un faible voltage, propre par conséquent à l'éclairage à incandescence, aux opérations de la métallurgie électrique, etc.

Dans les transformateurs bien faits, l'énergie du courant primaire EI est sensiblement égale à celle du courant induit E'I'. La différence est convertie en chaleur dans le transformateur ; elle doit être surtout attribuée au travail de l'aimantation du fer.

Il n'est pas nécessaire d'interrompre ici artificiellement le courant inducteur, vu qu'il est alternatif, c'est-à-dire, qu'il change de sens des

centaines de fois par seconde, et que chaque alternance cause des courants induits.

XVIII

DÉFINITION DU GALVANOMÈTRE ET SA THÉORIE.

" Le galvanomètre, est un instrument qui sert à mesurer l'intensité d'un courant par la déviation que celui-ci imprime à une aiguille aimantée. "

" Si l'on tend, dit Joubert, un fil au-dessus d'une aiguille horizontale (Fig. 9), de manière qu'il lui soit parallèle dans la position d'équilibre, la position que prend l'aiguille est celle de la résultante NR de deux forces horizontales, NT et NC, qu'on peut considérer comme agissant simultanément sur chaque pôle de l'aiguille ; l'une NT, due au champ magnétique terrestre et parallèle au méridien magnétique, l'autre NC due à l'action du courant, située dans un plan

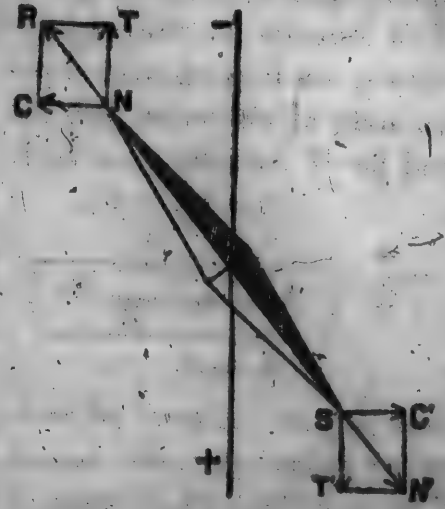


Figure 9

perpendiculaire au fil et par suite normale à la première.

" L'expérience montre que, toutes choses égales d'ailleurs, la déviation est indépendante du degré d'aimantation de l'aiguille, ce qui prouve que les deux composantes gardent entre elles un rapport constant et par suite que l'action du courant, comme celle du champ terrestre, est proportionnelle à la masse du pôle considéré.

" La déviation augmente d'ailleurs avec l'intensité du courant et, par suite, peut lui servir de mesure."

En général, pour augmenter l'action directrice du courant, on enroule le fil autour d'un cadre au centre duquel est placée l'aiguille (fig. 10), et on fait coïncider le plan du cadre avec le méridien magnétique. Il est facile de voir, en appliquant la règle d'Ampère, que les actions des diverses portions du cadre sont concordantes, comme ayant toutes leur gauche du même côté. Ce cadre est souvent désigné sous le nom de *multiplicateur de Schweigger*.

Figure 10.

On rend l'instrument plus sensible en employant un système d'aiguilles astatiques, sur lequel l'action directrice de la terre devient aussi faible que l'on veut. Pour donner alors plus de

stabilité magnétique au système d'aiguilles, on y ajoute un aimant directeur, qu'on peut approcher ou éloigner à volonté des aiguilles.

(Pour les instruments destinés à mesurer de très faibles courants, on multiplie le nombre des enroulements du fil, et au lieu de regarder directement le déplacement de l'aiguille, on note le déplacement d'un rayon lumineux qui se réfléchit sur un miroir fixé à l'aiguille. (galv. de Thomson).

Si l'aiguille est très courte et fixée au centre du champ électro-magnétique d'un courant enroulé sur un cercle relativement très grand, l'intensité du courant est proportionnelle à la tangente de l'angle de déviation. (bous. des tan.)

Si la bobine du multiplicateur de Schweigger se compose de deux fils distincts, en faisant passer dans chacun d'eux des courants en sens inverse, la déviation de l'aiguille sera causée par la différence des deux courants. (galv. différentiel).

Enfin, on peut à l'aide d'un appareil à dérivation (*shunt*) multiple, v. g., à $\frac{1}{1}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, ne faire passer dans le galvanomètre qu'une portion très faible mais connue du courant à mesurer, ce qui étend beaucoup les limites dans lesquels peut servir un galvanomètre.

On construit encore pour les besoins de l'industrie, des instruments, différents souvent du gal-

vanomètre proprement dit, mais dans lesquels le déplacement d'une aiguille donne directement, sur une échelle convenablement faite, l'intensité d'un courant en unités pratiques ordinaires. Ce sont les *ampèremètres*. Les *voltmètres* donnent le voltage d'une manière analogue. Dans les premiers, tout le courant passe par l'instrument ; dans les seconds, on n'y fait passer qu'un très faible courant dérivé.)

XIX

DÉFINIR LES PRINCIPALES UNITÉS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES PRATIQUES, SAVOIR : VOLT, AMPÈRE, OHM, COULOMB, FARAD ET WATT.

Pour effectuer les mesures des dimensions des courants électriques, il faut les rapporter à des termes de comparaison, à des unités connues. Le système d'unités adopté par le Congrès international d'électricité de Paris, en 1881, est connu sous le nom de système centimètre-gramme-seconde, ou simplement : système C. G. S. Les trois unités fondamentales mécaniques sont donc respectivement pour l'espace, la masse et le temps, le centimètre, le gramme et la seconde. Les unités qui servent aux mesures électriques dérivent de ces unités mécaniques.

AMPÈRE.—L'unité C. G. S. d'intensité de courant est celle d'un courant qui, roulé sous la forme d'un arc de cercle de 1 cent. de longueur et de 1 cent. de rayon, exerce une force de 1 dyne sur l'unité de masse magnétique placée en son centre. " L'unité pratique est un dixième de l'unité fondamentale ; on l'appelle *ampère.* "

(Les expressions ampère-heure, amp.-minute, amp.-seconde, s'appliquent au débit réalisé par des courants de 1 amp. se faisant pendant une heure, une minute, une seconde)

VOLT.—L'unité C. G. S. de force électromotrice est celle qui fait produire un travail d'un erg pendant une seconde à un courant ayant l'unité d'intensité.

" L'unité pratique est le *volt.* Elle égale 100,000,000 unités fondamentales." C'est sensiblement la force électromotrice d'un élément Daniell.

OHM.—L'unité C. G. S. de résistance est celle d'un conducteur par lequel passe un courant d'une unité C. G. S. d'intensité, lorsqu'il existe une différence de potentiel d'une unité C. G. S. entre ses deux extrémités.

" L'unité pratique de résistance est l'*ohm.* Elle égale 1,000,000,000 unités fondamentales." C'est sensiblement la résistance d'une colonne de mercure de 1mm. de section et de 106.8 cent. de longueur, la température étant 0°.

(Ces trois unités sont reliées entre elles par la loi de Ohm de la manière suivante :

$$I = \frac{E}{R}, \text{ c'est-à-dire, 1 amp.} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ ohm}}$$

COULOMB.—" C'est l'unité de quantité. C'est la quantité d'électricité qui passe par seconde dans un fil débitant un ampère."

FARAD.—L'unité de capacité C G S. est celle d'un conducteur qu'une unité de quantité élèverait à l'unité de potentiel.

" L'unité pratique ou le farad est celle d'un conducteur qu'un coulomb élèverait à un volt."

(Pour les mesures ordinaires, cette unité est beaucoup trop grande. Aussi se sert-on du *micro-farad* qui n'en est que la millionième partie.

En général, les préfixes *micro* et *méga* indiquent, le premier le millionième de l'unité et le second une quantité un million de fois plus grande. Ainsi :

$$1 \text{ microfarad} = \frac{1 \text{ farad}}{1{,}000{,}000}$$

$$1 \text{ megohm} = 1{,}000{,}000 \text{ ohms}$$

D'après le même principe, on se sert souvent du *milli-ampère* qui vaut un millième d'ampère.)

WATT.—L'unité C.G.S. de puissance électrique est le rapport de l'unité de travail à l'unité de temps. Or, l'unité pratique de travail ou d'éner-

gie est le produit d'un volt par un coulomb = un joule. Donc l'unité pratique de puissance, ou le watt, sera :

$$\frac{1 \text{ volt} \times 1 \text{ coulomb}}{1 \text{ seconde}} = 1 \text{ volt} \times 1 \text{ ampère, ou 1 joule par sec.}$$

(Le watt égale 10,000,000 d'ergs par seconde, ou 1/746 d'un *horse-power*. Donc 746 watts égalent un *horse-power* ; 736 watts un cheval-vapeur.)

JOULE.—Le produit d'un volt par un coulomb qui est l'unité pratique de travail électrique a reçu le nom de *joule*.

XX

ÉNONCER LE PRINCIPE DES MACHINES MAGNÉTO ET DYNAMO-ÉLECTRIQUES À COURANTS CONTINUS ET À COURANTS ALTERNATIFS.

Dans toutes les machines, soit magnéto ou dynamo-électriques, soit à courant continu ou à courant alternatif, le principe est le même. C'est le développement par induction d'un courant dans un fil conducteur en mouvement dans un champ magnétique.

Le courant change de sens, d'intensité et de force électromotrice, suivant le sens du déplacement du fil induit, sa longueur, sa section et sa vitesse de déplacement.

Dans les machines magnéto-électriques, le champ magnétique inducteur est celui des deux

pôles d'un aimant artificiel très énergique. La disposition de l'ensemble des conducteurs mobiles dans lesquels se produit le courant est la même que dans les dynamos. Dans les machines dynamo-électriques, à peu près les seules employées aujourd'hui, le champ magnétique inducteur est celui d'électro-aimants actionnés par le courant de l'induit lui-même.

Il en résulte que, dans le premier moment du fonctionnement de ces machines, le fil induit n'étant influencé que par le magnétisme rémanent, son courant est très faible. Mais ce courant est mis en communication avec les électro-aimants de champ eux-mêmes ; le résultat est que l'aimantation de ces derniers augmente ; le champ magnétique devient donc plus énergique, et le courant induit plus fort. Mais comme celui-ci est toujours astreint à passer en tout ou en partie (dynamo à série, à shunt ou compound) dans le fil des électro-aimants, l'intensité de ces derniers augmente sans cesse, jusqu'à atteindre le point de saturation. Par conséquent, le courant induit qui, non seulement passe dans les électro-aimants mais encore dans le circuit extérieur où il doit travailler, atteint bientôt une valeur très grande.

Dans les machines à courant continu, le fil induit est enroulé en forme de cylindre, de sphère ou d'anneau. Il forme ce que l'on appelle

l'armature de la machine. A l'intérieur des bobines de l'induit, il y a toujours une masse de fer aussi doux que possible, formée de lames ou de fils juxtaposés mais isolés les uns des autres, de manière à diminuer les courants de Foucault, c'est-à-dire, les courants qui se développent dans le fer de l'armature, sans nuire à la perméabilité magnétique. L'axe de rotation est perpendiculaire aux lignes de force du champ magnétique ainsi que les différents fils induits. Comme une moitié de ces fils se déplace en face d'un pôle et l'autre en face du pôle de nom contraire, le sens des courants induits est le même (positif, v. g) dans toute une moitié de l'armature, et il est opposé (négatif) dans l'autre moitié. Il ne s'agit plus que de disposer deux collecteurs (balais) en des points convenablement choisis sur l'ensemble des pièces communiquant avec les différentes séries de fils induits pour avoir, sur l'un, un courant avec force électromotrice d'un certain sens (positif), et sur l'autre, un courant de sens opposé (négatif).

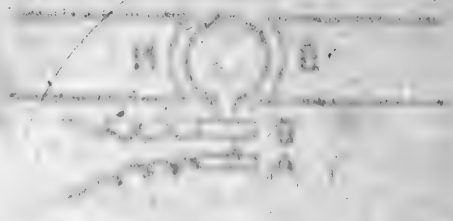
Comme chacun de ces balais ne communique jamais qu'avec cette partie de l'armature qui est soumise à l'action d'un même pôle, le courant qu'il recueille est toujours de même signe. Par conséquent, le courant général dans le circuit extérieur est sensiblement continu.

L'énergie de ces courants provient de l'énergie

mécanique qui est dépensée pour faire tourner l'armature dans le champ magnétique des électro-aimants de la machine.

Dans les machines à courants alternatifs, le courant de l'armature change plusieurs fois de sens par seconde

Supposons un cercle formé par un fil (Fig. 11) et tournant autour de son diamètre vertical dans le champ magnétique de deux électro - aimants alimentés par une source *étrangère*. Dans la moitié de gauche, le courant développé par le pôle S se fera, disons, de bas en haut. Le pôle de nom contraire N développera un courant inverse ou descendant, mais grâce à la disposition du fil, ces deux courants s'ajoutent évidemment l'un à l'autre, et l'on recueille la somme des deux aux anneaux A et B. Il suffit d'un instant de réflexion pour comprendre que, quand le cercle aura fait un demi-tour, le sens du courant induit aura changé dans le conducteur. Le fil correspondant à A aura pris la place du fil de B et sera négatif tandis que B sera devenu positif. Donc le sens du courant changera deux fois pour chaque rotation du cercle, et, dans le circuit communiquant avec AB, on aura des courants alternatifs.


B
A

Au lieu d'un cercle simple, supposons plusieurs cercles, formés chacun de plusieurs tours de fils. Adaptons aux extrémités de ces fils des collecteurs convenables, et nous aurons une machine à courants alternatifs du genre de celles qui servent dans l'industrie.

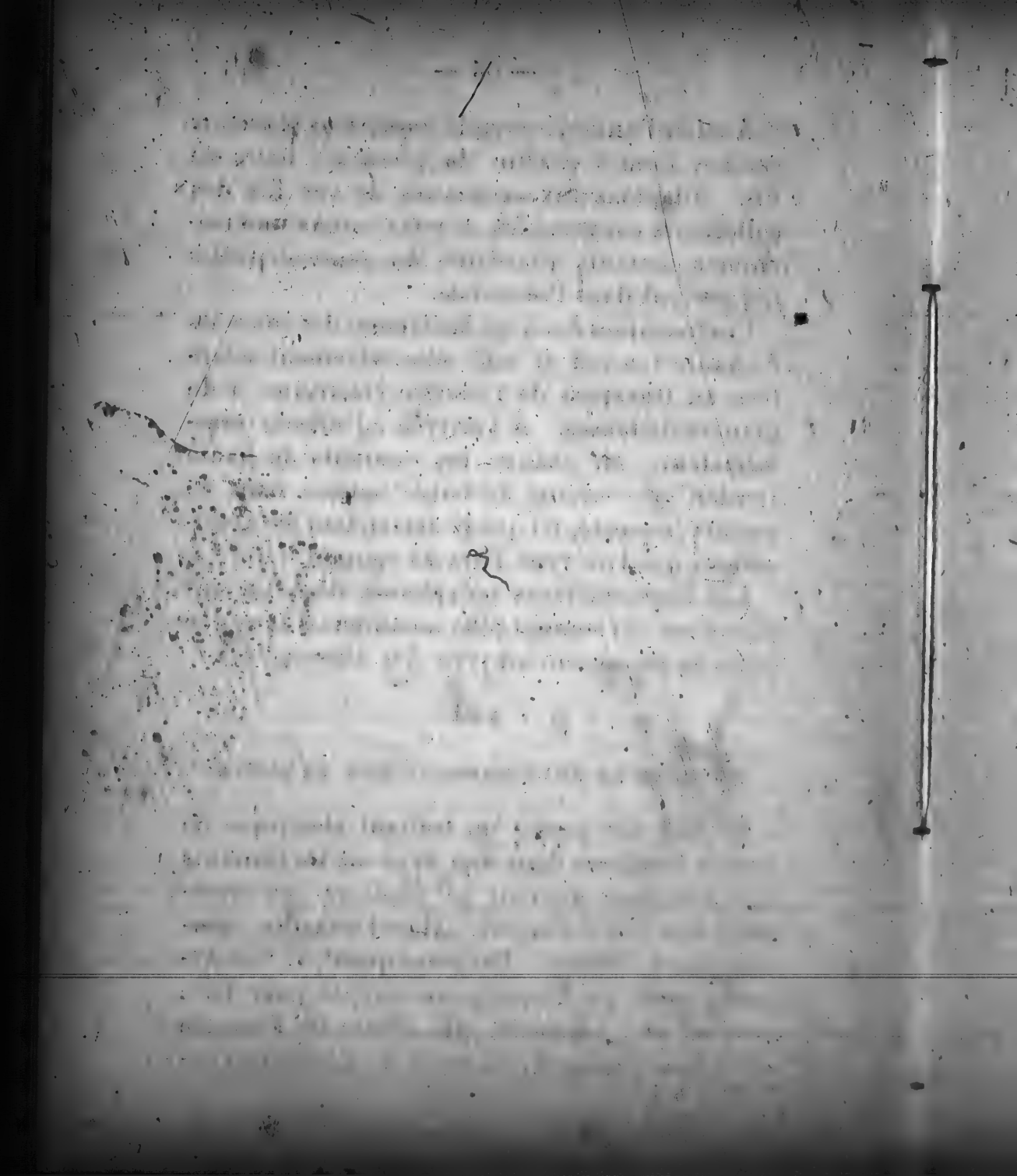
Ces machines donnent facilement des courants de haute tension et sont admirablement adaptées au transport de l'énergie électrique à de grandes distances. A l'arrivée, à l'aide de transformateurs, on change ces courants de haute tension en courants de faible tension mais de grande intensité, tel que le demandent les applications que l'on veut faire du courant.

Les électromoteurs polyphasés, dont les applications deviennent plus nombreuses tous les jours, se rapportent au type des alternateurs.

XXI

PRINCIPE DE RÉVERSIBILITÉ DES DYNAMOS.

Si l'on fait passer un courant électrique de source étrangère dans une dynamo, les courants de l'armature devront se déplacer conformément aux lois d'Ampère. Alors l'armature commencera à tourner. Par conséquent, si une dynamo reçoit de l'énergie mécanique pour faire tourner son armature, elle débite de l'énergie électrique ; mais si elle reçoit de l'énergie élec-



trique, elle peut produire de l'énergie mécanique. C'est ce fait que l'on désigne sous le nom de *réversibilité* des dynamos. On les appelle, dans ce cas, moteurs électriques. Un bon nombre de dynamos peuvent servir comme moteurs, bien que les moteurs proprement dits en diffèrent par quelques particularités de construction.

(Pour réaliser le transport de l'énergie à de grandes distances, on se sert beaucoup actuellement de moteurs à courants alternatifs ou de moteurs polyphasés. Ces moteurs qui, dans l'origine, demandaient à être mis en marche par une machine spéciale et qui ne fonctionnaient que quand leurs alternances étaient synchrones avec celles de l'électromoteur, se mettent maintenant en marche d'eux-mêmes et fonctionnent très bien).

MOTEURS ÉLECTRIQUES, LEURS AVANTAGES.

Les moteurs électriques offrent, dans un grand nombre de cas, des avantages évidents.

S'agit-il, par exemple, de distribuer l'énergie à un grand nombre de métiers relativement faibles, il est infiniment plus simple de faire cette distribution à l'aide de fils alimentant des moteurs locaux, que d'installer des arbres de couche avec roues d'angle, courroies, poulies, etc.

Il en est de même dans les travaux souterrains, tunnels, mines, etc., où les moteurs électriques

devraient être seuls employés. Il en est de même encore pour distribuer à de grandes distances une force motrice puissante, mais inutilisable en tout ou en partie là où elle se trouve, v. g., une chute d'eau. Il suffit d'y installer une ou plusieurs dynamos actionnées par le pouvoir d'eau. Ces machines transformeront l'énergie mécanique en énergie électrique et l'on pourra ensuite en faire la distribution partout où l'on voudra.

Sans doute, cette distribution ne se fait pas sans perte. Aussi, avant de faire une installation de ce genre, doit-on toujours en peser avec soin les avantages et les inconvénients.

A part toutes ces applications des moteurs électriques, nous devons dire qu'on s'en sert beaucoup maintenant pour remplacer la traction par les chevaux sur les lignes de tramway. C'est peut-être de ce côté que les applications de ces moteurs tendent à devenir plus considérables.

XXII

AVANTAGES DE LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE.

On peut les résumer sous les titres suivants : fixité de la lumière dans les lampes à incandescence ; éclat aussi vif que l'on veut ; lumière blanche permettant de distinguer les teintes les plus délicates ; absence de chaleur et de danger d'incendie dans une installation bien faite ; pureté

constante de l'air des appartements qui n'est souillé en aucune sorte par les lumières électriques à incandescence, les seules qu'on emploie dans les petits appartements ; etc.

LAMPES À ARC ET À INCANDESCENCE.

L'éclairage électrique se fait de deux manières : par les lampes à arc (c'est le mode le plus ancien) et par les lampes à incandescence. Dans les deux cas, la lumière se produit grâce à des résistances que l'on place dans le courant. Des conducteurs insuffisants sont chauffés à blanc, d'après la loi de Joule, et deviennent des sources de lumière.

Dans les lampes à arc, on fait arriver le courant par un crayon de charbon A (Fig. 12) pour le conduire ensuite sur un autre crayon B et de là dans le reste du circuit. Quand les deux crayons ne se touchent pas, le courant est interrompu ; mais s'ils se touchent par leurs pointes, le courant passe. La résistance très grande que présente ce conducteur imparfait y développe beaucoup de chaleur ; les crayons rougissent, brûlent et dégagent des gaz chauffés à une très haute température. Ces gaz sont des conducteurs imparfaits, mais ils conduisent tout de même, d'autant plus qu'ils renferment des par-

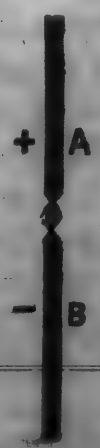
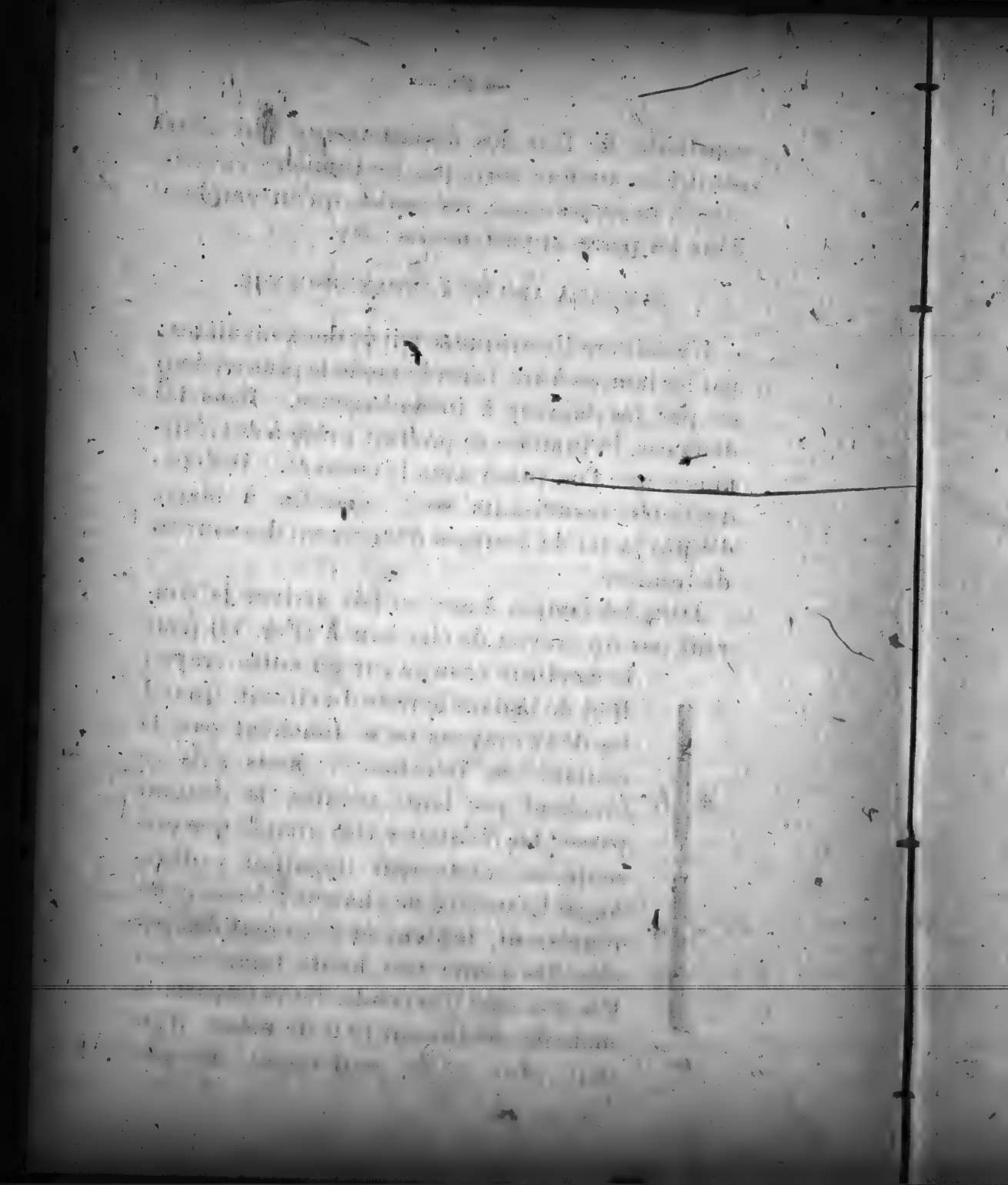


Fig. 12



celles de charbon arrachées par le courant aux deux crayons. On peut alors éloigner les pointes l'une de l'autre à une faible distance et le courant continue à passer en donnant une lumière éblouissante. C'est l'arc électrique.

Les charbons brûlent vu qu'ils sont dans l'air ; par conséquent, leur distance relative augmente. Aussi faut-il un mécanisme spécial qui les rapproche à mesure. Ce sont les *régulateurs* des lampes à arc qui jouent ce rôle. Leur nombre et leur construction varient à l'infini, chaque fabricant tenant à vendre une lampe qu'il dit de son invention. Au fond, c'est toujours le courant qui, étant influencé par la résistance qu'oppose un arc de plus en plus long, fait mouvoir, à l'aide d'un courant dérivé variant évidemment en raison inverse du courant principal, un mécanisme qui rapproche les charbons l'un de l'autre. Généralement, le charbon négatif est fixe ; c'est le charbon positif, brûlant deux fois plus vite, qui s'en rapproche de la quantité nécessaire. Dans chaque lampe, il y a toujours un circuit dérivé par lequel passe le courant quand on éteint cette lampe ; autrement on ne pourrait pas éteindre une lampe sans éteindre toutes les autres en même temps.

(L'arc est la source d'une force contrélectromotrice qui s'ajoute à sa résistance propre.

Les lampes à arc sont presque toujours disposées en série sur les circuits qui les alimentent. Il faut alors dans ces circuits une force électromotrice suffisante pour maintenir un courant de l'intensité voulue dans chacune des lampes. L'intensité doit donc rester la même, mais le potentiel varie proportionnellement au nombre des lampes.

Une lampe électrique de 2,000 chandelles dépense 10 ampères à 45 volts, soit 450 watts ou 0.6 H. P. En pratique, l'énergie mécanique dépensée pour une lampe à arc dépasse ce chiffre, vu les pertes multiples qui se produisent dans les machines, les dynamos, les communications de mouvements, etc.)

Dans l'éclairage à *incandescence*, la résistance interposée dans le circuit est un filament de charbon extrêmement fin, installé dans un petit globe de verre hermétiquement clos et vide d'air. Le filament est chauffé à blanc à cause de sa résistance, mais, comme il n'y a pas d'air dans le globe où il se trouve, il ne brûle pas. Sa durée n'est limitée que par la désagrégation moléculaire que le passage du courant y produit à la longue.

Ces lampes ne sont pas disposées en séries sur les conducteurs, mais *en pont*, ou en dérivation, d'un conducteur positif à un conducteur négatif. De cette façon, on peut éteindre une lampe sans

que les autres en souffrent et sans être obligé de ménager une dérivée comme dans les lampes à arc.

Les lampes d'une même installation ont en général une même résistance. Aussi la force électromotrice du courant général doit-elle être invariable. Ce qui doit varier dans le débit de la dynamo, c'est la quantité, proportionnellement au nombre de lampes allumées. Voilà pourquoi on choisit pour l'éclairage à incandescence des courants à potentiel constant et à intensité variable.

(Une lampe à incandescence ordinaire de 16 bougies, alimentée par un courant de 110 volts, demande généralement un courant de 0.6 d'ampère, ce qui représente à peu près 66 watt par lampe. Par conséquent un cheval-vapeur peut allumer environ 10 lampes. En pratique, on n'atteint presque jamais cette limite.)

SOUDURE ÉLECTRIQUE.

Si, dans la lampe à arc, on remplace les crayons de charbon par des tiges métalliques, de fer par exemple, les points en contact sont chauffés rapidement à une haute température, et on n'a qu'à les presser ensemble pour les souder. C'est la soudure électrique. L'opération est tellement rapide que les tiges ne s'échauffent qu'à une faible distance du point soudé.

Un point important est de chauffer l'endroit à souder aussi rapidement que possible. Et, comme la chaleur augmente proportionnellement au carré du courant, on se sert toujours pour cette opération d'un courant de faible voltage mais de grande intensité. Cette soudure électrique est excellente et elle a l'avantage de se faire sans l'intermédiaire d'un alliage quelconque.

MÉTALLURGIE ÉLECTRIQUE.

On désigne sous ce nom l'affinage des métaux, ou leur extraction des minérais à l'aide du courant électrique.

On peut opérer comme dans la galvanoplastie, en plongeant dans une dissolution métallique les électrodes d'un courant puissant. C'est de cette manière que sont souvent traités différents minérais d'argent et de cuivre, après avoir subi une première concentration par le grillage et la fusion.

Mais on peut aussi les traiter en chauffant à une haute température, par le passage du courant électrique, le minérai mélangé au flux convenable. C'est le faible pouvoir conducteur de ce mélange qui fait que le courant le chauffe à la température de réduction.

Jusqu'à présent, ce traitement n'a été employé que pour l'extraction des métaux relativement

précieux comme l'aluminium, ou encore pour la réduction des métaux très réfractaires comme le manganèse, le chrôme, l'uranium, etc. MM. Moissan et Violle ont également réussi à fabriquer, à l'aide du fourneau électrique, le diamant et quelques autres pierres précieuses.

XXIII

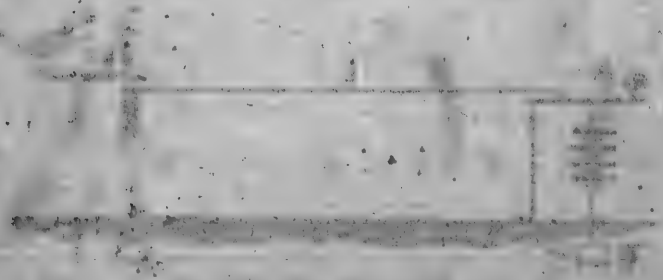
TÉLÉGRAPHE DE MORSE.

Le télégraphe est un appareil dont le but est d'établir la correspondance entre deux stations éloignées à l'aide de signaux électriques, qui se transmettent d'une station à l'autre par un fil conducteur convenablement isolé.

L'appareil dit de Morse est le plus simple de tous. Le *transmetteur* (Fig. 18) se compose d'un

Figure 18.

levier ou *clef* A qu'on peut abaisser sur un bouton. Tant que A touche ce bouton, le courant de la pile est lancé dans la ligne L. On peut donc,



en pressant le levier A plus ou moins longtemps, envoyer dans la ligne des courants électriques plus ou moins prolongés.

A la station d'arrivée, le courant entre dans le *récepteur* et traverse le fil d'un électro-aimant avant d'aller au sol T' L'électro-aimant attire une pièce de fer F, placée à l'extrémité d'un levier. Ce levier bascule et la pointe qui le termine à l'extrémité libre fait une marque sur une bande de papier qu'un mouvement d'horlogerie fait passer d'un mouvement uniforme en face de cette pointe.

On comprend que cette dernière fera sur la bande de papier des traits plus ou moins longs suivant que la clef du transmetteur aura été appuyée plus ou moins longtemps sur le bouton. Par conséquent la clef A et le levier du récepteur ont des mouvements absolument semblables et synchrones.

On a imaginé un alphabet de convention, dans lequel les différentes lettres sont représentées par des lignes et des points diversement groupés ensemble.

Dans les appareils actuels, on ne se sert plus guère de la bande de papier ; les opérateurs distinguent les lignes des points par le temps plus ou moins long qui s'écoule entre les deux mouvements du levier récepteur.

TÉLÉPHONE ET MICROPHONE

Le téléphone de Bell, (Fig. 14) se compose d'une tige d'acier aimantée NS. A l'un de ses

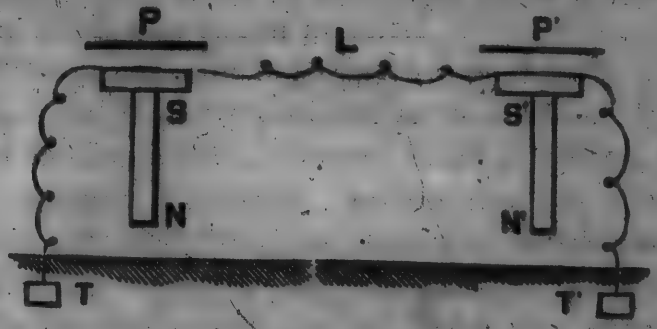
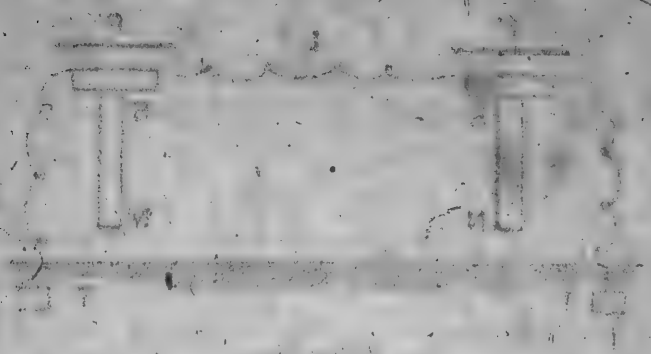


Figure 14.

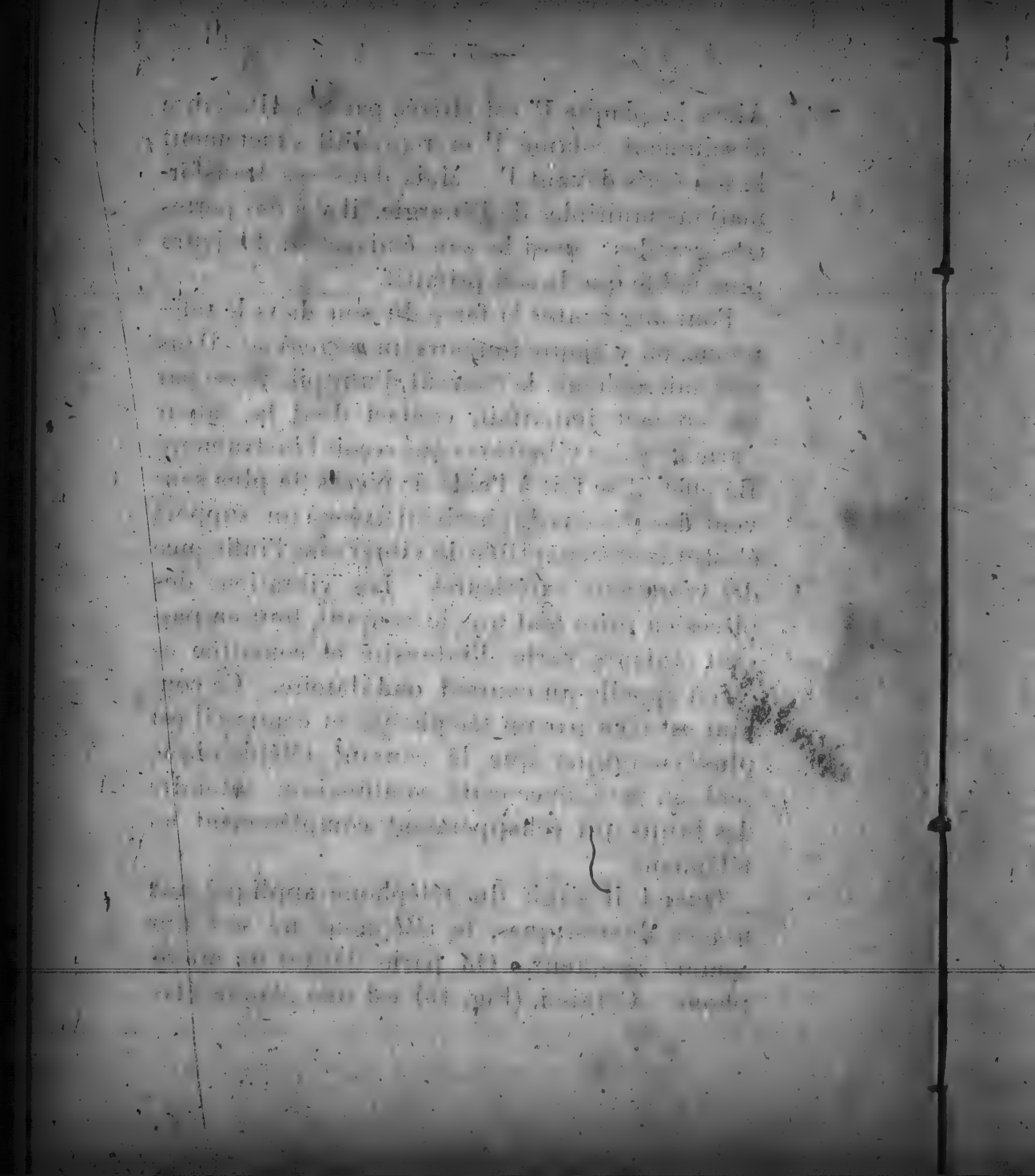
bouts, on fixe une bobine de fil très fin qui communique, d'un côté avec la ligne L et de l'autre avec la terre T. En face de cette bobine, est une plaque de fer mince et élastique S. On parle devant cette plaque. Elle vibre, par conséquent s'approche et s'éloigne de S. Il en résulte que le champ magnétique de S varie et que des courants se produisent dans la bobine, courants qui sont en rapport avec les vibrations de la plaque P. Ces courants suivent d'un côté le fil de ligne, et de l'autre, se perdent dans le sol. Arrivés dans l'autre bobine, ils réagissent sur l'aimantation de S' de manière à l'augmenter ou à la diminuer suivant leur sens et leur force.



Alors la plaque P' est attirée par S' ; elle vibre absolument comme P et reproduit exactement le son émis devant P. Mais dans ces transformations multiples de l'énergie, il y a des pertes très grandes ; aussi le son émis est-il toujours plus faible que le son primitif.

Pour augmenter la force du son dans le téléphone, on y ajoute toujours un *microphone*. Dans tout microphone, le courant d'une pile passe par un contact imparfait, contact dont la valeur varie avec les vibrations que reçoit l'instrument. En effet, il se fait à l'aide de pièces (le plus souvent des crayons de charbon) fixées à un support élastique et susceptible de vibrer sous l'influence des vibrations extérieures. Les vibrations des pièces en prise font que le courant, tout en passant toujours, varie d'intensité et constitue ce qu'on appelle un courant ondulatoire. Ce courant est reçu par un téléphone, et comme il est plus énergique que le courant téléphonique seul, on peut, avec cette combinaison, entendre des bruits qui échapperaient complétement au téléphone.

Quand il s'agit du téléphone appliqué aux usages domestiques, le téléphone ne sert que comme récepteur. On parle devant un microphone. Celui-ci, (Fig. 15) est une plaque élas-



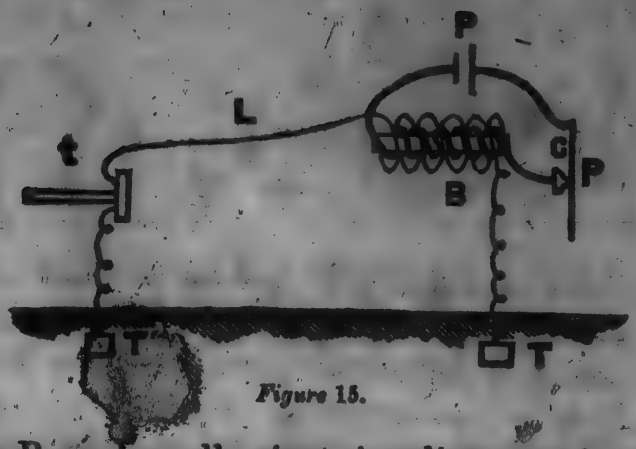


Figure 15.

tique P, sur laquelle vient s'appliquer un bouton de charbon C réalisant le contact imparfait dont il a été question plus haut et qui produit des courants ondulatoires. Le courant de la pile P, affecté directement par ce contact, n'est pas envoyé lui-même dans la ligne, mais bien dans le fil primaire d'une bobine d'induction B. C'est le courant induit de cette dernière qui suit le fil de ligne L et se rend dans le téléphone *t* de l'autre poste.

Il y a un grand nombre d'autres téléphones ; les microphones varient à l'infini ; mais en réalité, ils ne diffèrent que par des détails de construction.

APPENDICE.

Courants polyphasés. Un courant alternatif ordinaire peut être représenté, en fonction de temps, par une courbe sinusoïdale et caractérisé par son intensité et sa fréquence. Si deux de ces courants ont même intensité et passent synchroniquement par leurs valeurs nulles et leurs valeurs maxima, ces courants ont même *période* et même *phase*, la *période* étant l'intervalle qui sépare deux valeurs égales de l'intensité. Si ces deux courants ne passent pas simultanément par leurs valeurs nulles et maxima, ils sont *déphasés* ou *décalés*. On les appelle le plus souvent : courants *diphasés*, ou en général : courants *polyphasés*.

Généralement, les courants diphasés sont décalés de un quart de période et les courants triphasés de un tiers de période. Ces courants déterminent dans des circuits convenablement disposés des champs magnétiques tournants. Ces derniers obéissent au principe suivant établi par M. Ferraris, de Turin, en 1888 : La résultante de deux ou trois champs magnétiques produits par des courants di ou triphasés est un

champ magnétique tournant, d'intensité constante et de vitesse uniforme, faisant un tour complet pendant la durée d'une période. Il en résulte que si l'on place dans ce champ un circuit fermé sur lui-même, ce dernier sera le siège de courants induits tendant à le faire tourner dans le sens même de la rotation du champ. Au fond, c'est simplement le magnétisme de rotation d'Arago.

Il est donc très facile de réaliser un tel champ magnétique tournant et d'y installer un circuit magnétique fermé, lequel tournera quand les bobines produisant le champ magnétique seront parcourues par des courants bi ou triphasés. On se trouve ainsi avec un moteur à champ tournant fonctionnant très bien sans collecteurs ni balais, et, par suite, sans étincelles. En intercallant un inverseur de courant, la rotation change immédiatement de sens. Cette absence de collecteurs et de balais constitue un des grands avantages des moteurs à courants polyphasés.

Il est généralement admis que les moteurs à courants triphasés, décalés de un tiers de période, sont préférables aux systèmes diphasés, décalés de un quart. En effet, avec les courants diphasés, il faut quatre fils ou au moins trois, dont l'un, nécessairement plus gros, sert de fil de retour commun aux deux autres. Avec les courants triphasés, décalés de un tiers de période, la

somme algébrique des courants élémentaires étant toujours nulle, chaque fil sert de retour à la somme des deux autres ; et, par conséquent, trois fils suffisent et ils sont tous d'égale section.

Courants alternatifs de haute fréquence et de haut potentiel. Dans une bobine d'induction, la différence de potentiel aux deux bornes du fil induit augmente considérablement avec la rapidité des interruptions ou des alternances du circuit primaire. Actuellement, il est impossible d'obtenir, soit avec un alternateur, soit avec un interrupteur mécanique, plus de 20,000 interruptions par secondes. Encore est-il très difficile d'atteindre cette limite, à raison de la délicatesse des appareils, délicatesse qui en rend le fonctionnement régulier toujours précaire.

Pour obtenir des alternances plus nombreuses et qui se comptent par plusieurs centaines de mille par seconde, on se sert des décharges oscillantes d'un condensateur.

Dans l'induit d'une bobine d'induction, on intercale un condensateur. La décharge qui se produit alors entre les bornes de l'excitateur est oscillante, et ses oscillations se succèdent avec une rapidité prodigieuse. Pour les utiliser, on fait passer le circuit induit de la première bobine dans le fil primaire d'une seconde bobine, de telle façon que ce fil primaire est ainsi parcouru

par autant de courants alternants qu'il y a d'oscillations dans l'étincelle de l'excitateur de la première bobine. On entoure le primaire de la seconde bobine par un fil long et fin, lequel donne, grâce au passage des décharges oscillantes de la première bobine, des courants induits d'une force électromotrice énorme. Les deux fils de cette seconde bobine sont plongés dans un bain d'huile, l'huile étant le seul isolant capable de résister à la tension de ces derniers courants secondaires.

Les étincelles données par ces courants sont très longues et très bruyantes. Cependant on peut fermer le circuit où elles se produisent en mettant les mains sur les boules de l'excitateur sans rien sentir. Des étincelles de cette longueur, données par une bobine ordinaire, seraient foudroyantes.

Si les boules de l'excitateur sont remplacées par deux disques en regard, un tube de Geisler, mis entre ces disques, s'illumine sans même avoir aucun contact entre eux.

En passant un cercle fait avec un gros fil de cuivre et dans lequel on intercale une lampe à incandescence, autour de ce circuit secondaire, la lampe s'allume. On l'allume encore en la mettant sur la longueur d'un gros fil avec lequel on a shunté le fil secondaire.

C'est M. N. Tesla qui a réalisé le premier ces expériences, en les accompagnant d'une foule d'autres extrêmement intéressantes et très brillantes. Ces faits nouveaux laissent entrevoir, dans un avenir plus ou moins rapproché, de nouvelles applications dont l'importance est encore mal définie, tout en donnant les plus légitimes espérances.

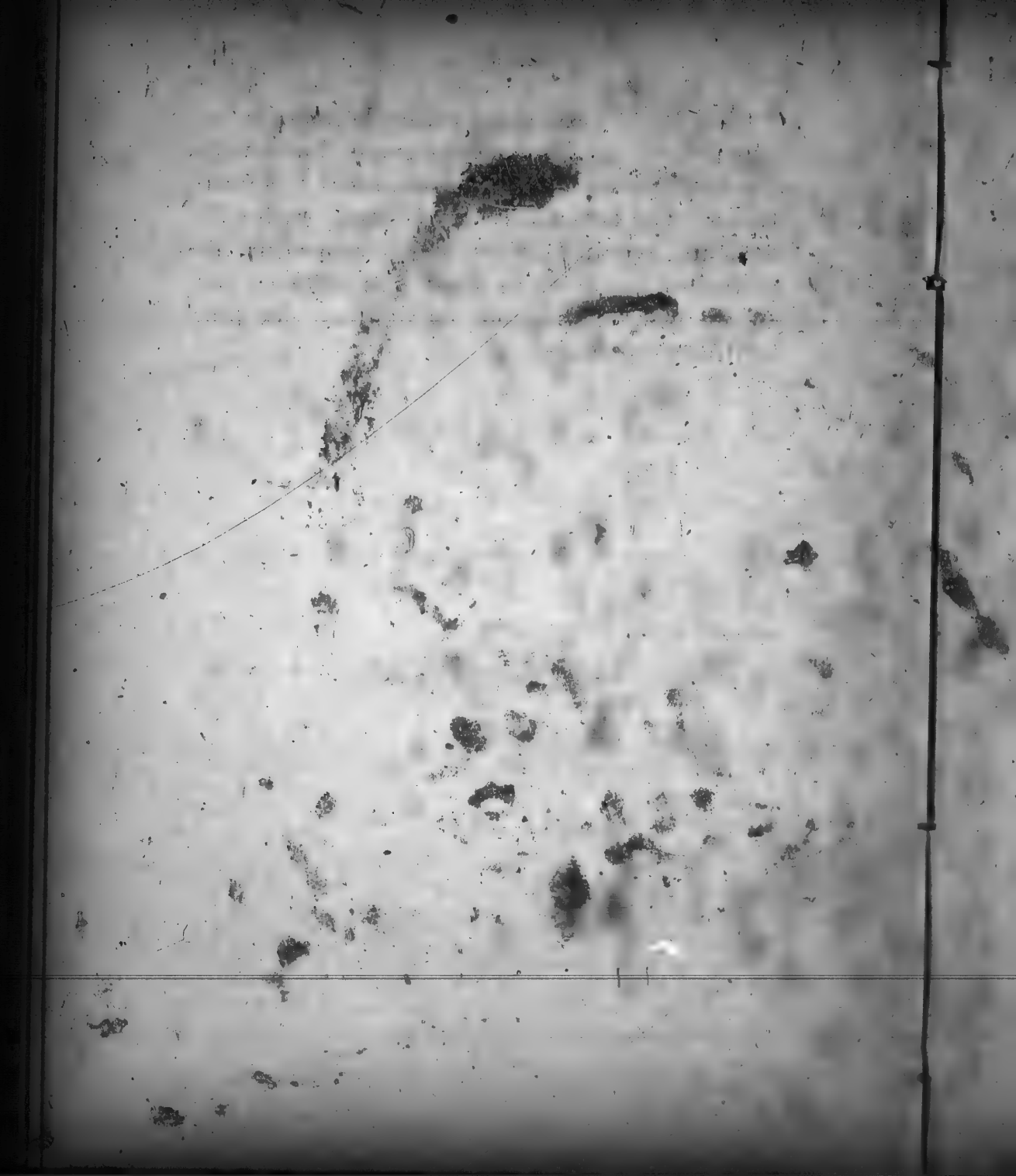


TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

	Page
Accumulateurs	28
Actions mutuelles des courants et des aimants	40
Actions mutuelles des courants les uns sur les autres	41
Actions secondaires de l'électrolyse	27
Aiguilles astatiques	56
Aimantation, un procédé d'	39
Aimant directeur des galvanomètres	57
Aimants artificiels	34
Aimants de champ	62
Aimants naturels	34
Ampèremètre	58
Ampère, unité	59
Anode	26
Arc électrique	63
Argenture	31
Armature des dynamos	61
Attractions électriques, lois de Coulomb	6
Attractions magnétiques, leur loi	36
Axe des solénoïdes	44
Balais collecteurs des dynamos	63
Balance de Coulomb	7
Batteries électriques	17
Bichromate, piles au	22
Bobine de Ruhmkorff	50
Bobine d'induction	50
Boussole des tangentes	57
Bouteille de Leyde	17
Bunsen, pile de	22

	Page
Capacité électrique	14
Cathode	26
Champ électrique	13
Champ électro-magnétique	42
Champ magnétique	37
Champ terrestre	39
Charges électriques, actions mutuelles des	2
Cheval-vapeur	61
Condensateurs	15
Condensateurs usuels	17
Conducteurs, bons et mauvais	4
Conservation de l'électricité	3
Contact, théorie du	2, 21
Coulomb, unité électro-magnétique	60
Coulomb, unité électro statique	7
Courants alternatifs de haut potentiel	80
Courants de Foucault	63
Courant électrique	23
Courant inducteur	48
Courant induit	48
Courants mobiles, leur orientation	42
Courants polyphasés	78
Courant terrestre	42
Courants thermo-électriques	31
Daniell, pile de	23
Déclinaison	40
Densité électrique	8
Diélectriques	4
Dimensions des courants	58
Disposition des lampes en pont	70
Disposition des lampes en série	70
Distribution des charges électriques	8
Dorure	31
Dynamos à série, shunt et compound	62
Dyne	7

	Page
Electrisation par frottement	1
Electrisation par influence	9
Electro-aimants	45
Electro-aimants de champ	62
Electrodes	26
Electrolyse et électrolyte	26
Electrophore	19
Electroscope à feuilles d'or	11
Equilibre d'une charge électrique	8
Equipotentielles, surfaces	14
Erg	13
Extra courant	49
Fantômes magnétiques	38
Faraday, loi de	27
Farad, unité électro-magnétique	59
Farad, unité électro-statique	15
Force coercitive	46
Force condensante	15
Force contreélectromotrice des arcs	69
Force électromotrice	12
Galvanomètre	55
Galvanomètre de Thompson	57
Galvanomètre différentiel	57
Galvanoplastie	31
Génératrice des solénoïdes	44
Grillages des piles secondaires	30
Horse-power	61
Inclinaison	40
Induction dans les mauvais conducteurs	10
Induction électro-magnétique	48
Induction électro-statique	9
Intensité du courant	24
Interrupteur à alcool	52
Interrupteur à marteau	52

	Page
Isoclines, lignes	41
Isogones, lignes	41
Isolants	4
Joule, sa loi	25
Joule, unité électro-magnétique	61
Lampes à arc	68
Lampes à arc, dépense des	70
Lampes à incandescence	70
Lampes à incandescence, dépense des	71
Lampes électriques	25
Lignes de force électriques	5
Lignes de force magnétiques	37
Ligne neutre des aimants	35
Loi de Faraday	27
Loi de Lenz	49
Lois de Ohm et de Joule	24
Lois électro-dynamiques d'Ampère	43
Lumière électrique	67
Machines à courants alternatifs	64
Machines à courants continus	62
Machines dynamo-électriques	61
Machines électriques	18
Machines magnéto électriques	61
Magnétisme rémanent	46
Magnétisme, théorie d'Ampère	47
Masse électrique, unité de	7
Masse magnétique, unité de	38
Melloni, thermo-multiplicateur de	33
Méridien magnétique	40
Métallurgie électrique	72
Microphone	75
Moteurs électriques	66
Moteurs polyphasés	66
Négatif, état	2
Niveau électrique	14

	Page
Ohm, loi de	24
Ohm, unité électro-magnétique	59
Orientation des aimants par les courants	42
Perméabilité magnétique	46
Personnification du courant	42
Pile hydro-électrique, théorie chimique de la	20
Piles secondaires	28
Piles thermo-électriques	33
Plan d'épreuve	8
Planté, pile de	29
Pointes, pouvoir des	9
Points conséquents	35
Polarisation des piles	22
Pôles de la pile	20
Pôles des aimants	35
Pôles nord et sud des aimants	35
Pôles magnétiques terrestres	41
Positif, état	2
Potentiel électrique	12
Potentiel magnétique	37
Pression électro-statique	8
Récepteur du télégraphe	74
Régulateur des lampes électriques	69
Répulsions électriques, lois de Coulomb	6
Répulsions magnétiques, lois des	36
Résistances	9
Réversibilité des dynamos	65
Self-induction	49
Shunt	57
Solénoïdes	44
Solénoïdes, leur action électro-magnétique	44
Soudure électrique	71
Surfaces équipotentielles	14
Système C. G. S. d'unités	58

	Page
Tangentes, boussole des	57
Télégraphe de Morse	73
Téléphone de Bell	75
Tension électro-statique	9
Théorie d'un seul fluide électrique	3
Thermo-électricité	32
Thermo-multiplicateur	33
Thomson, galvanomètre de	57
Transformateurs	53
Transmetteur du télégraphe	72
Unité de capacité électro-magnétique	60
Unité de capacité électro-statique	15
Unité de masse électrique	7
Unité de masse magnétique	36
Unités électro-magnétiques pratiques	53
Variations des constantes magnétiques	41
Voltamètre	28
Voltmètre	58
Volt, unité	59
Watt, unité	61